

Aktive Funktionsbeschreibungen zur Planung und Überwachung des Betriebs von Gebäuden und Anlagen

Von der
Fakultät Architektur, Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina
zu Braunschweig

zur Erlangung des Grades eines
Doktoringenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte

Dissertation

von
Stefan Plesser
geboren am 10. Mai 1970
aus Schloss Neuhaus

Eingereicht am 14. Januar 2013

Disputation am 11. März 2013

1. Bericht: Univ.-Prof. Dr.-Ing. M. Norbert Fisch

2. Bericht: Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Bernhard Rumpe

2013

I. VORWORT UND DANK

Diese Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter und Leiter der Arbeitsgruppe Energie- und Qualitätsmanagement am IGS – Institut für Gebäude- und Solartechnik. Motivation und Idee stammen aus einer Vielzahl von Forschungsprojekten und untersuchten Gebäuden.

Bei Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. M. Norbert Fisch bedanke ich mich sehr herzlich sowohl für die Betreuung meiner Dissertation als auch für die Möglichkeiten, das Vertrauen und die Freiheit, das Thema des Energie- und Qualitätsmanagements am IGS kontinuierlich zu entwickeln.

Ebenso bedanke ich mich bei Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Bernhard Rumpel für seine Bereitschaft, die Arbeit als Bericht zu begleiten und die vielen interdisziplinären Diskussionen zwischen IGS und seinem Lehrstuhl für Software Engineering an der RWTH Aachen.

Bedanken möchte ich mich ebenfalls bei allen Kolleginnen und Kollegen in Braunschweig und Aachen, die meine Arbeit mit Ihrer Unterstützung in den verschiedenen Forschungsprojekten ermöglicht haben. Ein besonderer Dank gilt dabei Herrn Dipl.-Inform. Claas Pinkernell, der parallel zu meiner Dissertation die Grundlagen für die Software Energie-Navigator entwickelt und dazu seine eigene Dissertation geschrieben hat.

Das Forschungsprojekt „Energie-Navigator“, in dessen Kontext diese Arbeit entstand, wurde gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages (FKZ: 0327444A).

Mein besonderer Dank gilt meiner Familie und meiner Frau Kirsten für ihre Unterstützung und für ihr Verständnis, dass ich von der wertvollen Zeit an den Wochenenden immer wieder etwas für meine Arbeit abgezweigt habe.

Braunschweig, den 14.03.2013

II. KURZFASSUNG

Diese Arbeit entwickelt eine Methodik zur Spezifikation und Prüfung von Funktionen gebäudetechnischer Anlagen und führt den Nachweis ihrer Anwendbarkeit in der Praxis.

Ausgangspunkt ist die Erkenntnis, dass eine Ursache für die häufig festzustellende suboptimale Funktion von Gebäuden ein mangelhaftes Qualitätsmanagement in der Gebäudeautomation ist. Problematisch sind insbesondere unzureichende Beschreibungen der angestrebten Funktionen in der Planung. Bis heute hat sich kein einheitliches Beschreibungsmittel für Anlagenfunktionen durchgesetzt. Eine Analyse von Funktionsbeschreibungen heutiger Gebäude zeigt eine weitgehend beliebige Verwendung von freien Texten und grafischen Darstellungen. In der Folge kann im Gebäudebetrieb kaum bewertet werden, ob Anlagen korrekt funktionieren. Ein standardisierter Controlling-Prozess und eindeutige Qualitätsanforderungen fehlen.

Als Antwort auf dieses Defizit wird die Methodik der Aktiven Funktionsbeschreibung vorgestellt. Mit einem vereinfachten Modell aus Zustandsräumen können Anlagenfunktionen in einzelnen Betriebszuständen durch Betriebsregeln mit logischen und mathematischen Operatoren sowie domänenspezifischen Beschreibungsmitteln spezifiziert werden. Nach der Umsetzung der Funktionen in den entsprechenden Anlagen, in der Praxis durch den Errichter der Gebäudeautomation, werden Mess- und Betriebsdaten der Anlagen zu einzelnen Zeitpunkten auf Übereinstimmung mit den im Zustandsraum spezifizierten Betriebsregeln geprüft.

Die Ergebnismerte für die Zustandsräume können über geeignete Zeiträume aggregiert werden. Die relative Häufigkeit gültiger Werte in einem Zeitraum wird als Betriebsgüte definiert. Sie ist das Qualitätsmaß für die Umsetzung der Spezifikation und kann als Anforderung an Anlagenfunktionen in Ausschreibungen und bei Abnahmen verwendet werden.

Die Methodik wird auf drei typische gebäudetechnische Anlagen – einen Heizkreis mit Rücklaufbeimischung, eine Lüftungsanlage mit Zentralgerät sowie eine Anlage zur Nutzung oberflächennaher Geothermie – angewendet. Dabei wird gezeigt, dass die Spezifikation von Funktionen und deren Überprüfung wie beschrieben für die untersuchten Anlagen und Funktionen möglich ist. Darüber hinaus werden erste Grenzwerte als Qualitätsmaße für eine mögliche Standardisierung der Methodik in der Bau- und Betriebspraxis entwickelt.

Grenzen der Methodik liegen in der starken Vereinfachung des Zustandsmodells. So ist zwar eine Prüfung der Konsistenz von Betriebszuständen möglich, nicht jedoch die unmittelbare Prüfung ihrer Abfolge. Außerdem können durch unbestimmte Zustände der Anlagen unvermeidbare systembedingte Fehler in der Auswertung entstehen. Diese sind bei der Definition von Mindestanforderungen an die Betriebsgüte zu berücksichtigen.

Gerade die Vereinfachung der Beschreibung bietet aber die realistische Möglichkeit einer zeitnahen Anwendung in der Praxis. Forschungsbedarf besteht dazu neben der Erprobung im Feld im kontrollierten Einsatz in Anlagentestständen, um standardisierte Funktionsbeschreibungen für typische Anlagen und geeignete Grenzwerte für die Betriebsgüte zu entwickeln.

Mit der Aktiven Funktionsbeschreibung steht die dringend benötigte durchgängige Methodik zur funktionalen Qualitätssicherung von Gebäuden und Anlagen zur Verfügung.

III. SUMMARY

This work presents a methodology for the specification and evaluation of functions of building automation systems and proves its practical applicability in building projects.

Starting point is the insight that a lack of quality management is a source for frequent malfunctions of building automation systems. Especially the specifications of desired functions in the design phase are inadequate. Until today no comprehensive methodology for the description of intended functions of automation systems has been well-established. An analysis of functional specifications of current buildings shows a largely arbitrary use of free texts and graphics. Naturally it is almost impossible to evaluate the corresponding building operations. A standardized controlling process and a precise level of quality are missing.

As an answer to this deficit the methodology of Active Functional Specifications is presented. With a simplified state space model it is possible to specify system functions in individual operation states using operational rules consisting of logical and mathematical operators as well as domain specific descriptions. After the implementation of the functions – in reality usually through the constructor of the automation system – measured data of discrete points of time from the automation system can be evaluated for compliance with the specification.

The results of the state space evaluation can then be aggregated over useful periods of time. The relative frequency of valid results within a period of time is defined as the quality of operation. It is the quality measure for the implementation of the specification and can be used as requirement for operations in tenders as well as for commissioning and hand over procedures.

The methodology is applied on three typical building services: a heating circuit with return mixing loop, an air handling unit and a system for the use of surface near geothermal energy. It is shown that the specification and evaluation of functions is possible for the selected systems as described. In addition first limit values for the quality of operation are derived that can serve as initial measures for a standardization of the methodology in design and operation.

Limits of the methodology exist due to the extensive simplification of the state model. While it is possible to evaluate the consistency of operation states, an evaluation of their succession is not possible. Furthermore undetermined states of a system can cause an immanent error in the evaluation. The magnitude of this error has to be considered for the definition of quality requirements.

But the very simplification opens the realistic opportunity for an application in building design and operation within short time. Besides the application in field tests a need for further research exists in the application of the methodology in test beds to develop standardized specifications and appropriate limit values for the quality of operation.

Active Functional Specifications provide the urgently needed integrated methodology for a functional quality management for buildings and building services.

IV. INHALTSVERZEICHNIS

I.	Vorwort und Dank	2
II.	Kurzfassung	3
III.	Summary	4
IV.	Inhaltsverzeichnis	5
V.	Nomenklatura	8
VI.	Abbildungsverzeichnis	10
VII.	Tabellenverzeichnis	14
1	Einleitung	16
2	Stand des Wissens und der Technik	16
2.1	Gebäudeperformance durch integrale Planung	17
2.1.1	Gebäudebetrieb und Automation	19
2.1.2	Performanceverluste	23
2.1.3	Fazit	23
2.2	Gebäude- und Anlagenfunktionen im Lebenszyklus	23
2.2.1	Leistungsphasen und Lebenszyklus	24
2.2.2	Planung	25
2.2.3	Errichtung, Abnahme und Inbetriebnahme	28
2.2.4	Betrieb	30
2.2.5	Commissioning (Cx)	34
2.2.6	Fault Detection and Diagnosis (FDD)	36
2.2.7	Fazit	41
2.3	Darstellungskonzepte für Funktionsbeschreibungen	42
2.3.1	Anlagenschemen, Funktionslisten, Texte	42
2.3.2	Zustandsautomaten	44
2.3.3	Adressierung	45
2.3.4	Dokumentenformate	45
2.3.5	Fazit	46
3	Analyse von Funktionsbeschreibungen in der Praxis	47
3.1.1	Funktionsbeschreibung Neues Regionshaus Hannover	47
3.1.2	Funktionsbeschreibung EnergieForum Berlin	49
3.1.3	Funktionsbeschreibung Bürogebäude VGH Versicherung	52
3.1.4	Funktionsbeschreibung Bürogebäude Neumühlen 4	53
3.1.5	Funktionsbeschreibung Volkswagen Bibliothek Berlin	54
3.1.6	Funktionsbeschreibung Bürogebäude Gelsenwasser	57
3.1.7	Fazit	58

4	These und Methodik	59
4.1	These	59
4.2	Methodisches Vorgehen	59
4.3	Vorarbeiten	60
4.4	Abgrenzung	61
4.4.1	„Überprüfung“ und „Optimierung“ des Betriebs	61
4.4.2	Standardisierung	61
4.4.3	Technische Umsetzung	61
4.5	Technische Grundlagen	62
4.6	Grafische Darstellungen für Betriebsdaten	62
5	Aktive Funktionsbeschreibungen	63
5.1	Betriebsregeln BR und Eigenschaften	63
5.2	Beschreibungsmittel	64
5.3	Betriebsabweichung BA	67
5.4	Abweichungen zwischen Spezifikation und Betrieb	69
5.5	Zustandsräume ZR und Betriebszustände BZ	70
5.6	Betriebsdaten	71
5.7	Auswertung von Zustandsräumen	72
5.8	Zustandsmerker	73
5.9	Betriebsgüte	73
6	Anwendungsbeispiele	75
6.1	Heizkreis mit Rücklaufbeimischung	75
6.1.1	Beschreibung der Referenzanlage	75
6.1.2	Betriebsdaten	76
6.1.3	Betrieb der Umwälzpumpe	76
6.1.4	Witterungsgeführte Vorlauftemperatur	83
6.1.5	Temperaturspreizung	93
6.1.6	Der Heizkreis als komplexer Zustandsraum	100
6.1.7	Fazit zum statischen Heizkreis	103
6.2	Lüftungsanlage mit Zentralgerät	104
6.2.1	Beschreibung der Referenzanlage	104
6.2.2	Betriebsdaten	105
6.2.3	Steuerung der Betriebszeit	105
6.2.4	Regelung der Ablufttemperatur	112
6.2.5	Sequenz der Behandlungsstufen	117
6.2.6	Die Lüftungsanlage als komplexer Zustandsraum	121
6.2.7	Fazit zur Lüftungsanlage	124
6.3	Oberflächennahe Geothermieranlage	125
6.3.1	Beschreibung der Referenzanlage	125
6.3.2	Betriebsdaten	126
6.3.3	Vorlauftemperatur Betonkernaktivierung	126
6.3.4	Volumenstrom Betonkernaktivierung	135
6.3.5	Die Geothermieranlage als komplexer Zustandsraum	142
6.3.6	Fazit zur oberflächennahen Geothermieranlage	146

7	Zusammenfassung und Ausblick	147
7.1	Einführung in die Baupraxis	147
7.2	Neue Anwendungskonzepte	149
7.3	Weiterer Forschungsbedarf	149
7.3.1	Betriebszustände und Transitionen	149
7.3.2	Standardisierte Grenzwerte	150
7.3.3	Technisch-wirtschaftliche Evaluation	150
7.4	Ausblick	150
8	Anhang	151
8.1	Veröffentlichungen und Vorträge zu Aktiven Funktionsbeschreibungen und zum Energie-Navigator	151
8.2	Literatur	152

V. NOMENKLATURA

a. Begriffe und Abkürzungen

Cx	Commissioning (Inbetriebnahme)
DDC	Direct Digital Control (Speicherprogrammierbare Steuerung)
EnEV	Energie-Einsparverordnung
FDD	Fault Detection and Diagnosis (Fehlererkennung und –diagnose)
FM	Facility Management
FPT	Functional Performance Test (Funktionaler Leistungstest)
GA	Gebäudeautomation
HK	Heizkreis
HOAI	Honorarordnung für Architekten und Ingenieure
MSR	Mess-, Steuer-, Regelungstechnik
PDCA	Plan-Do-Check-Act
RL	Rücklauf (eines hydraulischen Systems)
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
UML	Unified Modelling Language
VL	Vorlauf (eines hydraulischen Systems)
VOB	Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen
WschVo	Wärmeschutz-Verordnung

b. Begriffe, die in dieser Arbeit eingeführt bzw. definiert werden

AFB	Aktive Funktionsbeschreibung
BA	Betriebsabweichung
BG	Betriebsgüte
BZ	Betriebszustand
C	Konstante (constant)
ZP	Zeitprogramm
ZR	Zustandsraum

c. Größen

h	relative Häufigkeit	[%]
H	absolute Häufigkeit	[-]
\dot{m}	Massenstrom	[kg/h]
ϑ	Temperatur	[°C]
$\Delta\vartheta$	Temperaturdifferenz, -spreizung	[K]
t	Zeitpunkt	[-]
T	Zeitspanne	[s]
\dot{V}	Volumenstrom	[m³/h]

d. Indices

abl	Abluft
absenk	Absenkbetrieb
amb	Umgebung, Außen(-luft)
bot	unterer (Grenzwert), bottom
day	Tag
month	Monat
Ist	Im Betrieb eines Gebäudes oder einer Anlage gemessener Wert
lim	Grenzwert
n	Zähler
normal	Normalbetrieb
quarter	Vierteljahr
Soll	Sollwert einer Größe in einer konventionellen oder Aktiven Funktionsbeschreibung
spreizung	Temperaturspreizung zwischen Vor- und Rücklauf
t	Zeitpunkt
T	Zeitspanne, Zeitintervall
top	oberer (Grenzwert), top
week	Woche
year	Jahr

In den zitierten Funktionsbeschreibungen werden zahlreiche andere Bezeichnungen, Abkürzungen und Größen verwendet, die hier nicht im Einzelnen aufgeführt werden.

VI. ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1	Integrale Planung - Schlanke Gebäude: Das EnergieForum Berlin (Foto: IGS)	18
Abbildung 2	Wirkungsplan einer Steuerung	19
Abbildung 3	Wirkungsplan eines Regelkreises	20
Abbildung 4	Sensorik (Temperatursensor) und Aktorik (Pumpe, Ventil) in einem Heizkreis	21
Abbildung 5	Anlagenvisualisierung mit dynamischen Einblendungen	21
Abbildung 6	Prozessschritte für die Durchführung eines GA-Projekts nach DIN EN ISO 16484	27
Abbildung 7	PDCA-Zyklus nach DIN EN 16001, Leitfaden Umweltbundesamt	32
Abbildung 8	Verschiedene Arten mathematischer Prozessmodelle	37
Abbildung 9	Klassifikationsschema für FDD Methoden nach Katipamula und Brambley	38
Abbildung 10	Übersicht über Methoden der Fehlererkennung nach Isermann	39
Abbildung 11	Beispiel der Anlagendarstellung einer Lüftungsanlage	43
Abbildung 12	Sequenzbild für die Luftbehandlungsstufen einer Lüftungsanlage	43
Abbildung 13	Zustandsgraph für eine Lüftungsanlage nach VDI 3814 Teil 6	44
Abbildung 14	Darstellung des Anlagenschemas für drei Heizkreise	48
Abbildung 15	Darstellung von Kennlinien im Normalbetrieb einer Lüftungsanlage: Sequenz von Heiz- und Kühlregister einer Lüftungsanlage (links) und Winter- /Sommerkompensation für die Zulufttemperatur	48
Abbildung 16	Darstellung von Bedingungen für den Wechsel des Betriebszustands	48
Abbildung 17	Parametrierung durch Hervorhebung im Text	49
Abbildung 18	Parametrierung von Sollwerten in Tabellen	49
Abbildung 19	Parametrisierung von Zeitprogrammen in Tabellen	49
Abbildung 20	Darstellung von Betriebszuständen mit Datenpunktadressen (EFB, M1H03)	50
Abbildung 21	Darstellung von Kennlinien mit Datenpunktadressen (EFB, M1H03)	51
Abbildung 22	Darstellung einer Sequenz von zwei Stellgliedern	51
Abbildung 23	Darstellung einer Regelung durch einen Beschreibungstext und eine Kennlinie mit Parametrierung	52
Abbildung 24	Darstellung der Parametrisierung und Adressierung in den Beschreibungstexten	52
Abbildung 25	Darstellung der Bedingungen für Wechsel der Betriebszustände	53
Abbildung 26	Darstellung eine Zeitprogramms	53
Abbildung 27	Darstellung einer Schar von Kennlinien für die Regelung der Vorlauftemperatur von Heizungsanlagen	54
Abbildung 28	Tabellarische Darstellung von Wechselbedingungen zwischen Betriebszuständen	55

Abbildung 29	Anlagenschema (Format A3)	55
Abbildung 30	Tabellarische Darstellung der Anlagenbauteile mit Funktionsbeschreibungen	55
Abbildung 31	Darstellung eines Anlagenschemas	56
Abbildung 32	Datenpunktliste mit Klartextbezeichnungen	56
Abbildung 33	Textliche Erläuterung des Anlagenaufbaus und einzelner Funktionen	57
Abbildung 34	Textliche Erläuterung der Betriebszuständen einer Wärmepumpenanlage	57
Abbildung 35	Textliche Erläuterung der Übergänge zwischen den Betriebszuständen einer Wärmepumpenanlage	57
Abbildung 36	Schematischer Zustandsgraph für den Betrieb einer Wärmepumpenanlage	58
Abbildung 37	Beispiele von Rastergrafiken für die Darstellung von Betriebszuständen (1), Betriebsabweichungen (2) sowie Betriebsregeln und Zustandsräumen (3)	62
Abbildung 38	Beispiel einer Kennlinie für die Vorlauftemperatur eines Heizkreises	66
Abbildung 39	Zeitprogramm (grün: gültige Zeitpunkte, rot: ungültige Zeitpunkte)	66
Abbildung 40	Zeitverhalten eines Regelkreises, nach Wellenreuther	68
Abbildung 41	Ursprüngliche Darstellung des Zustandsgraphen	71
Abbildung 42	Vereinfachte Darstellung des Zustandsgraphen	71
Abbildung 43	Datentransformation von der Gebäudeautomation zum Monitoring	72
Abbildung 44	Prinzip des Vergleichs und der Bewertung von Spezifikation (SOLL) und Betrieb (IST)	74
Abbildung 45	Erste von zwei grafischen Darstellungen der Heizkreise in der Funktionsbeschreibung des Neuen Regionshauses Hannover (Büro HSK, Quelle: Region Hannover)	75
Abbildung 46	Schema eines statischen Heizkreises und Installation von Vorlauf und Rücklauf	76
Abbildung 47	Auszüge aus der textlichen Beschreibung der Heizkreise in der Funktionsbeschreibung des Neuen Regionshauses Hannover (Büro HSK, Quelle: Region Hannover)	77
Abbildung 48	Parametrierung und Parametrisierung	77
Abbildung 49	Zeitprogramm Normalbetrieb für die Betriebsweise des Heizkreises (grün=gültig)	78
Abbildung 50	Viertelstündliche Betriebszustände für den Heizkreis in einem Jahr (schwarz: BZ0/Aus, blau: BZ1/Normalbetrieb, grün: BZ2/Absenkbetrieb) Betriebsregel BRt (grün=gültig; rot=ungültig)	80
Abbildung 51	Betriebsgüten BGday, BGweek, BGmonth für das Jahr 2009, chronologisch und sortiert	81
Abbildung 52	Auszüge aus der textlichen Beschreibung der Heizkreise in der Funktionsbeschreibung des Neuen Regionshauses Hannover (Büro HSK, Quelle: Region Hannover)	83
Abbildung 53	Stützpunkte der Kennlinien	85
Abbildung 54	oben: Betriebszustände für den Heizkreis in einem Jahr (schwarz: BZ0/Aus, blau: BZ1/Normalbetrieb, grün: BZ2/Absenkbetrieb) unten: Betriebsabweichung der Vorlauftemperatur (schwarz: Betriebszustand AUS)	86

Abbildung 55	Häufigkeit der Betriebsabweichung (BA) bezogen auf die vorhandenen Betriebsdaten in 2009 in den Betriebszuständen Normal- und Absenkbetrieb (n=24.693)	87
Abbildung 56	Betriebsabweichung $BA_t < -20K$ (Farbwerte dunkelblau und schwarz, markiert)	87
Abbildung 57	Betriebsabweichung $-20K \leq BA_t < -5K$ (Farbwerte hellblau, markiert)	88
Abbildung 58	Betriebsabweichung $5K \leq BA_t < 46K$ (Farbwerte orange/rot, markiert)	89
Abbildung 59	oben: Betriebsabweichung (1, Farbskala) Betriebsregel (2, grün: TRUE, rot/schwarz: FALSE)	90
Abbildung 60	Betriebsgüten BGday, BGweek, BGmonth für das Jahr 2009, chronologisch und sortiert	91
Abbildung 61	Auszüge aus der textlichen Beschreibung der Heizkreise in der Funktionsbeschreibung des Neuen Regionshauses Hannover (Büro HSK, Quelle: Region Hannover)	93
Abbildung 62	Kennlinie CSpreizung	94
Abbildung 63	oben: Viertelstündliche Betriebszustände für den Heizkreis in einem Jahr (schwarz: 0/Aus, blau: 1/Normalbetrieb, grün: 2/Absenkbetrieb) unten: Farbskala	95
Abbildung 64	Häufigkeit der Betriebsabweichung (BA) bezogen auf die vorhandenen Betriebsdaten in 2009 in den Betriebszuständen Normal- und Absenkbetrieb (n=24.693)	96
Abbildung 65	Auswertung der Betriebsregel Temperaturspreizung $\Delta\theta$ (grün: TRUE, rot: FALSE, schwarz: keine Auswertung möglich bzw. keine Eigenschaft definiert)	97
Abbildung 66	Betriebsgüten BGd, BGs, BGm für das Jahr 2009, chronologisch und sortiert	98
Abbildung 67	Auswertung von Zustandsmerker (1) (schwarz: BZ0, blau: BZ1, grün: BZ2) Auswertung der Betriebsregeln (2-4) und des Zustandsraum (5) grün: gültig, rot: ungültig	101
Abbildung 68	Betriebsgüten BGd, BGs, BGm für das Jahr 2009, chronologisch und sortiert	102
Abbildung 69	Anlagenschema des Zentralgeräts der Lüftungsanlage in der Funktionsbeschreibung des Neuen Regionshauses Hannover (Büro HSK, Quelle: Region Hannover)	104
Abbildung 70	Beschreibung der Zeitschaltfunktionen	105
Abbildung 71	Steuerung von Klappen und Ventilatoren	106
Abbildung 72	Häufigkeitsverteilung der gemessenen Gesamtdrücke in 2009	107
Abbildung 73	Zeitprogramme für den Betrieb der Lüftungsanlage in Stufe 1 (ZP1: Mo.-Fr. (oben), ZP2: Sa. (unten); grün=gültig)	108
Abbildung 74	oben: Viertelstündliche Betriebszustände für die Lüftungsanlage in einem Jahr (schwarz: BZ0/Aus, blau: BZ1/Zone 1, grün: BZ2/Zone 1+2) unten: Betriebsregel BRt (grün=gültig; rot=ungültig)	109
Abbildung 75	Betriebsgüten BGd, BGs, BGm für das Jahr 2009, chronologisch und sortiert	110
Abbildung 76	Konventionelle Funktionsbeschreibung der Lüftungsanlage	112
Abbildung 77	Einstellbare Sollwerte der Anlage	112

Abbildung 78	Stützpunkte der Kennlinie Mindest-Ablufttemperatur	113
Abbildung 79	oben: Viertelstündliche Betriebszustände für die Lüftungsanlage (schwarz: BZ0/Aus, blau: BZ 1/Zone 1, grün: BZ 2/Zone 1+2) unten: Betriebsregel BRt, (grün=gültig; rot und schwarz=ungültig)	114
Abbildung 80	Betriebsgüten BGd, BGs, BGm für das Jahr 2009, chronologisch und sortiert	115
Abbildung 81	Konventionelle Funktionsbeschreibung der Sequenz	117
Abbildung 82	oben: Viertelstündliche Betriebszustände für die Lüftungsanlage in einem Jahr (schwarz: BZ0/Aus, blau: BZ 1/Zone 1, grün: BZ 2/Zone 1+2) unten: Logische Betriebsabweichung BA _{t,b} (grün=gültig; rot=ungültig)	119
Abbildung 83	Betriebsgüten BGd, BGs, BGm für das Jahr 2009, chronologisch und sortiert	120
Abbildung 84	Zustandsmerker (1) (schwarz: Zustand 0, blau: Zustand 1, grün: Zustand 2) Auswertung der Betriebsregeln (2-4) und des Zustandsraum (5) grün: gültig, rot und schwarz: ungültig	122
Abbildung 85	Betriebsgüten BGd, BGs, BGm für das Jahr 2009, chronologisch und sortiert	123
Abbildung 86	Anlagenschema der Geothermieranlage des EnergieForums Berlin	125
Abbildung 87	Auszug aus der Beschreibung der Vorlauftemperaturregelung in der Funktionsbeschreibung des EnergieForums Berlin / Fa. Honeywell	127
Abbildung 88	Auszug aus der Beschreibung der Vorlauftemperaturregelung in der Funktionsbeschreibung des EnergieForums Berlin / Fa. Honeywell	127
Abbildung 89	Stützpunkte der Kennlinien Vorlauftemperatur BKT	128
Abbildung 90	Volumenstrom BKT und (fehlerhaftes) Zeitprogramm (blau=EIN)	129
Abbildung 91	Zeitprogramm für die Betonkernaktivierung im Kühlfall	129
Abbildung 92	oben: Betriebszustände der Betonkernaktivierung (schwarz: BZ0/Aus, blau: BZ 1/Heizbetrieb, grün: BZ 2/Kühlbetrieb) unten: Betriebsabweichung der Vorlauftemperatur (schwarz: Betriebszustand AUS)	130
Abbildung 93	Häufigkeit der Betriebsabweichung (BA) bezogen auf die vorhandenen Betriebsdaten in 2009 in den Betriebszuständen 1 oder 2 (n=27.629)	130
Abbildung 94	Betriebsabweichung BA _t < -1K (Wertebereich: Farbskala, andere Werte: schwarz)	131
Abbildung 95	Betriebsabweichung 3K ≤ BA _t < 7K (Wertebereich: Farbskala, andere Werte: schwarz)	131
Abbildung 96	Betriebsabweichung 7K ≤ BA _t < 10K (Wertebereich: Farbskala, andere Werte: schwarz)	132
Abbildung 97	oben: Betriebsabweichung (1, Farbskala; schwarz: keine Spezifikation) unten: Gültigkeit der Betriebsregel (2, grün: TRUE, rot: FALSE)	133
Abbildung 98	Betriebsgüten BGd, BGs, BGm für das Jahr 2009, chronologisch und sortiert	134
Abbildung 99	oben: Betriebszustände für die Betonkernaktivierung in einem Jahr (schwarz: 0/Aus, blau: 1/Heizen, grün: 2/Kühlbetrieb) unten: Betriebsabweichung des Volumenstroms, (Farbskala)	136

Abbildung 100	Häufigkeit der Betriebsabweichung (BA) bezogen auf die vorhandenen Betriebsdaten in 2009 in den Betriebszuständen Normal- und Absenkbetrieb	137
Abbildung 101	Betriebsabweichung $BA_t < -20\text{m}^3/\text{h}$	137
Abbildung 102	Betriebsabweichung $-20\text{m}^3/\text{h} < BA_t < -3\text{m}^3/\text{h}$	138
Abbildung 103	Betriebsabweichung $-3\text{m}^3/\text{h} < BA_t < 3\text{m}^3/\text{h}$	138
Abbildung 104	Betriebsabweichung $3\text{m}^3/\text{h} < BA_t < 20\text{m}^3/\text{h}$	138
Abbildung 105	Betriebsabweichung $BA_t > 20\text{m}^3/\text{h}$	139
Abbildung 106	oben: Betriebsabweichung (1, Farbskala) unten: Gültigkeit der Betriebsregel (2, grün: TRUE, rot: FALSE)	140
Abbildung 107	Betriebsgütern BGd, BGs, BGm für das Jahr 2009, chronologisch und sortiert	141
Abbildung 108	Auswertung von Zustandsmerker (1) (schwarz: Zustand 0, blau: Zustand 1, grün: Zustand 2) Auswertung der Betriebsregeln (2-6) und des Zustandsraum (7) grün: gültig, rot: ungültig	144
Abbildung 109	Betriebsgütern BGd, BGs, BGm für das Jahr 2009, chronologisch und sortiert	145

VII. TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1	Technisch-physikalische Eigenschaften gebäudetechnischer Anlagen (Beispiele)	64
Tabelle 2	Liste der verwendeten logischen Verknüpfungen	65
Tabelle 3	Liste der verwendeten Vergleichsoperatoren	65
Tabelle 4	Liste der verwendeten mathematischen Operatoren	65
Tabelle 5	Liste der Basisfunktionen und Bezugszeiträume	67
Tabelle 6	Betriebszustände und Parametrisierung der Eigenschaften in der Aktiven Funktionsbeschreibung	79
Tabelle 7	Betriebsgüte für die Vierteljahre (Q1-4) und das gesamte Jahr 2009	82
Tabelle 8	Grenzwerte für die Betriebsgüte des Zustandsraums	82
Tabelle 9	Betriebszustände und Parametrisierung der Eigenschaften in der Aktiven Funktionsbeschreibung	85
Tabelle 10	Wertebereiche für die Analyse der Betriebsabweichung	87
Tabelle 11	Betriebsdaten innerhalb der Grenzwerte	89
Tabelle 12	Betriebsgüte für die Vierteljahre und des gesamten Jahr 2009	92
Tabelle 13	Grenzwerte für die Betriebsgüte des Zustandsraums	92
Tabelle 14	Betriebszustände und Parametrisierung der Eigenschaften in der Aktiven Funktionsbeschreibung	94
Tabelle 15	Betriebsdaten innerhalb der Grenzwerte	96
Tabelle 16	Betriebsgüte für die Vierteljahre und des gesamten Jahr 2009	98
Tabelle 17	Grenzwerte für die Betriebsgüte des Zustandsraums	99
Tabelle 18	Zustandsraum für den Heizkreis	100
Tabelle 19	Betriebsgüte für die Vierteljahre und des gesamten Jahr 2009	102
Tabelle 20	Grenzwerte für die Betriebsgüte des Zustandsraums	103
Tabelle 21	Spezifikation der Betriebszeiten Belüftung Zone 1	107

Tabelle 22	Betriebszustände und Parametrisierung der Eigenschaft in der Aktiven Funktionsbeschreibung	108
Tabelle 23	Betriebsgüte für die Vierteljahre und des gesamten Jahr 2009	110
Tabelle 24	Grenzwerte für die Betriebsgüte des Zustandsraums	111
Tabelle 25	Betriebszustände und Parametrisierung der Betriebsregel in der Aktiven Funktionsbeschreibung	114
Tabelle 26	Betriebsgüte für die Vierteljahre und des gesamten Jahr 2009	116
Tabelle 27	Grenzwerte für die Betriebsgüte des Zustandsraums	116
Tabelle 28	Betriebszustände und Parametrisierung der Eigenschaft in der Aktiven Funktionsbeschreibung	118
Tabelle 29	Betriebsgüte für die Vierteljahre und des gesamten Jahr 2009	120
Tabelle 30	Grenzwerte für die Betriebsgüte des Zustandsraums	121
Tabelle 31	Betriebszustände und Parametrisierung der Eigenschaft in der Aktiven Funktionsbeschreibung	121
Tabelle 32	Betriebsgüte für die Vierteljahre und des gesamten Jahr 2009	123
Tabelle 33	Grenzwerte für die Betriebsgüte des Zustandsraums und Anzahl der Zeitspannen im untersuchten Jahr, in dem der Grenzwert eingehalten wurde	124
Tabelle 34	Betriebszustände und Parametrisierung der Eigenschaft in der Aktiven Funktionsbeschreibung	129
Tabelle 35	Wertebereiche für die Analyse der Betriebsabweichung	131
Tabelle 36	Betriebsdaten innerhalb der Grenzwerte	133
Tabelle 37	Betriebsgüte für die Vierteljahre und des gesamten Jahr 2009	134
Tabelle 38	Grenzwerte für die Betriebsgüte des Zustandsraums	135
Tabelle 39	Betriebszustände und Parametrisierung der Eigenschaft in der Aktiven Funktionsbeschreibung	136
Tabelle 40	Wertebereiche für die Analyse der Betriebsabweichung	137
Tabelle 41	Betriebsdaten innerhalb der Grenzwerte	139
Tabelle 42	Betriebsgüte für die Vierteljahre und des gesamten Jahr 2009	141
Tabelle 43	Grenzwerte für die Betriebsgüte des Zustandsraums	142
Tabelle 44	Betriebszustände und Parametrisierung der Eigenschaft in der Aktiven Funktionsbeschreibung	143
Tabelle 45	Betriebsgüte für die Vierteljahre und des gesamten Jahr 2009	145
Tabelle 46	Grenzwerte für die Betriebsgüte des Zustandsraums und Anzahl der Zeitspannen im untersuchten Jahr, in dem der Grenzwert eingehalten wurde	146
Tabelle 47	Aktive Funktionsbeschreibungen in den ATV nach DIN 18386	148

1 EINLEITUNG

Zahlreiche Forschungsprojekte haben in den letzten Jahren weltweit gezeigt, dass Gebäude durch fehlerhafte Automation, unsachgemäße Nutzung oder falsche Betriebsführung oft nicht die bei richtiger Funktion mögliche Energieeffizienz erreichen¹. Aus diesem Grund wird in verstärktem Maße das Monitoring, also eine messtechnische Überwachung des Gebäudebetriebs als notwendiger Bestandteil des Gebäudemanagements angesehen. Die Einführung von Energieverbrauchsausweisen und die Pflicht zur *Energetischen Inspektion* von Klimaanlage in der Energieeinsparverordnung 2007² unterstützen diese Tendenz.

In den folgenden Abschnitten werden zunächst das Normenwesen, die Abläufe am Bau sowie die wissenschaftliche Literatur zur Fehlererkennung und –diagnose (Fault Detection and Diagnosis - FDD) untersucht. Die Analyse zeigt, dass es einen dringenden Bedarf an Methoden zur effektiveren funktionalen Qualitätssicherung in Gebäuden gibt. Katipamula und Brambley³ sehen Entwicklungsbedarf im Bereich FDD insbesondere hinsichtlich der Automatisierung der Werkzeuge und eines umfassenderen Anwendungsbereichs. Sie fordern unter anderem die Integration von FDD in die sonstigen Automations- und Entscheidungsprozesse sowie die intensivere Erprobung außerhalb von Testständen an realen Gebäuden.

Als zentrales Problem wird das Fehlen eines geeigneten Beschreibungsmittels für Gebäudefunktionen identifiziert. Im Anschluss an die Synopse zum Stand des Wissens und der Technik werden deshalb Funktionsbeschreibungen von sechs Gebäuden detailliert auf die verwendeten Beschreibungsmittel hin untersucht. Aus dieser Analyse werden Anforderungen an eine effektive Methodik zur Qualitätssicherung entwickelt.

2 STAND DES WISSENS UND DER TECHNIK

Bauherren, Ingenieure, Bauunternehmen und Gebäudemanager sind seit einigen Jahren zunehmend mit dem Phänomen konfrontiert, dass Gebäude oft ihre in der Planung angestrebten technischen Ziele insbesondere hinsichtlich der Energieeffizienz im Betrieb nicht erreichen. Da der Energieverbrauch des Gebäudebestands eine Schlüsselrolle bei der Reduzierung von Treibhausgasen und der Erreichung der Klimaschutzziele der Bundesregierung spielt, stellt sich hier eine neue Herausforderung für alle Akteure.

Dieser Abschnitt betreibt Ursachenforschung zu diesem Problem. Er gibt zunächst einen kurzen Überblick zu den technischen Entwicklungen in den letzten Jahreszehnten und identifiziert Ansatzpunkte für Verbesserungen. Anschließend wird beschrieben, wie energierelevante Funktionen dieser Gebäude und ihrer Anlagen im Lebenszyklus geplant und überwacht werden. Es folgt eine Übersicht zu vorhandenen Darstellungskonzepten für Gebäude- und Anlagenfunktionen. Dieser wird eine Analyse von Funktionsbeschreibungen aus umgesetzten Projekten gegenübergestellt, die stichprobenartig zeigt, wie die theoretischen Darstellungskonzepte heute in der Planungs- und Betriebspraxis angewendet werden.

2.1 Gebäudeperformance durch integrale Planung

Nach den Ölkrisen der 70er Jahre wuchs der Bedarf nach einer Reduzierung des Energieverbrauchs. In Deutschland wurde frühzeitig die Notwendigkeit energieeffizienter Gebäude erkannt. Seit 1977 wurde eine Reihe von verbindlichen Anforderungen an die Energieeffizienz von Gebäuden definiert. Während die ersten Wärmeschutzverordnungen⁴ lediglich Vorgaben für einzelne Bauteile machten, forderte die WSchVo 95⁵ bereits eine Bilanzierung hinsichtlich des Primärenergiebedarfs von Gebäuden. Im Zuge der Umsetzung der European Performance of Buildings Directive⁶ wurde in Deutschland die Energieeinsparverordnung 2007⁷ eingeführt, die eine ganzheitliche Bewertung des Energiebedarfs von Gebäuden auf Basis eines umfassend definierten Berechnungsmodells nach DIN V 18599⁸ fordert. Heute sind Gebäude für rund 40% des gesamten CO₂-Austoßes in der Europäischen Union und damit maßgeblich für den Klimawandel verantwortlich⁹. Es ist politisches Ziel in Europa, den gesamten Energieverbrauch bis zum Jahr 2020 um 20% abzusenken¹⁰. Dazu sollen die Mitgliedstaaten der EU national Pläne entwickeln, um die Zahl von „nearly zero-energy buildings“¹¹, zu erhöhen, also von Gebäuden, die nahezu keine Energie mehr verbrauchen bzw. unter Einbeziehung am Gebäude erzeugter regenerativer Energie eine annähernd ausgeglichene Energiebilanz aufweisen

Parallel zu den gestiegenen Anforderungen an die Energieeffizienz sind auch die Anforderungen an das Raumklima in Gebäuden gestiegen, also der Wunsch nach für den Menschen gesunden und leistungsfördernden Innenräumen. Insbesondere das in den 60er Jahren in vollklimatisierten Gebäuden aufgetretene Sick-Building-Syndrome¹² hat dazu geführt, die Auswirkungen des Innenraumklimas auf die Gesundheit und das Wohlbefinden des Menschen zu untersuchen und entsprechende Standards festzulegen. In der Folge sind zahlreiche wissenschaftliche Untersuchungen, insbesondere von Fanger¹³, zu diesem Thema durchgeführt und entsprechende normative Standards eingeführt worden. Besonders wichtig ist in diesem Zusammenhang die DIN EN ISO 7730¹⁴, die Bedingungen für die thermische Behaglichkeit und entsprechende Messverfahren beschreibt.

Nachdem Energieeffizienz und Nutzerkomfort zunächst als weitgehend unabhängige bzw. sogar gegensätzliche Zielsetzungen gesehen wurden, zeigte sich in den 90er Jahren, dass beide durch integrale Planungsprozesse miteinander verknüpft und gemeinsam optimiert werden können. Der Begriff der *Integralen Planung* bezeichnet ein ganzheitliches Planungsverständnis, das „einzelne Planungsaufgaben zu einem optimierten Ganzen“¹⁵ zusammenführt. Entsprechende Methoden und Konzepte werden seitdem in der Praxis angewendet, wurden in zahlreichen Publikationen umfassend dokumentiertⁱ und haben unter Titeln wie „Energiedesign“ (Univ.-Prof. Dr.-Ing. M. Norbert Fisch/TU Braunschweig)¹⁶ oder „Climadesign“ (Univ.-Prof. Dr.-Ing. Gerhard Hausladen/TU München)¹⁷ Einzug in die Lehre an deutschen Hochschulen gefunden. Das angestrebte Ergebnis dieser Entwicklungen sind *schlanke* Gebäude, die ein hochwertiges Innenraumklima mit einem geringeren Einsatz an technischer Gebäudeausrüstung und niedrigem Energieverbrauch erreichen¹⁸ wie z.B. das Bürogebäude EnergieForum Berlin, Baujahr 2003, siehe Abbildung 1.

ⁱ Stellvertretend für die große Anzahl an Veröffentlichungen wird an dieser Stelle auf die Website des BMWi-Forschungsfeldes EnOB – Energieeffizientes Bauen des bine Informationsdienstes verwiesen (www.enob.info).



**Abbildung 1 Integrale Planung - Schlanke Gebäude: Das EnergieForum Berlin
(Foto: IGS)**

Seit Juni 2007 besteht die „DGNB - Deutschen Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen“, die das ganzheitliche Konzept von Gebäuden unter Einbeziehung von Aspekten wie der Werthaltigkeit und der Recyclingfähigkeit noch weiter fasst und hierzu Gebäude mit einem Gütesiegel auszeichnet.

Um den gestiegenen Anforderungen gerecht zu werden, haben sich insbesondere die frühen Phasen der Konzeptionierung von Gebäuden verändert. Integral geplante Gebäude zeichnen sich oft durch eine Reduzierung der technischen Anlagen bzw. deren Dimensionierung aus. So kann durch hochwertige Fassaden die Auslegungsleistung von Heiz- und Kühlsystemen in Räumen reduziert werden. Ein weiteres Kennzeichen ist die Verknüpfung von Funktionen unterschiedlicher Anlagen. So kann eine elektrisch betriebene Kälteanlage durch das Kühlen von Räumen mittels natürlicher Nachtlüftung über motorisch geöffnete Fenster entlastet werden. Oberflächennahe geothermische Wärme- und Kältespeicher verknüpfen Heiz- und Kühlfunktionen im saisonalen Betrieb. Auch die Energieeffizienz zahlreicher einzelner Produkte wie Pumpen, Ventilatoren, Heizkessel und Beleuchtungssystemen wurde deutlich verbessert.

Das integrale Zusammenwirken der verschiedenen Gewerke ist auch im Normenwerk erkennbar. Seit 2002 fordert die Richtlinie 2002/91/EG des europäischen Parlaments und des Rates¹⁹ für die energetische Bewertung von Gebäuden eine Gesamtenergiebilanzierung unter Berücksichtigung von Heizung, Kühlung, Lüftung, Beleuchtung, Trinkwarmwasser und Hilfsenergie. Die entsprechenden Normen zur Berechnung spiegeln den Ansatz der Integralen Planung auch durch den eigenen zunehmenden Umfang und eine steigende Komplexität wieder. Die Deutsche Norm DIN V 18599²⁰ zur Berechnung des Gesamtenergiebedarfs von Gebäude umfasst rund 1.000 Seiten und ist nur noch mit Hilfe von Software anwendbar. Darüber hinaus sind Computerprogramme zur dynamischen Gebäudesimulation ein Standard-Werkzeug in der Gebäudeplanung geworden.

Die Betriebsführung der auf diese Weise integrierten und damit in komplexer Weise zusammenwirkenden technischen Anlagen in Gebäuden kann durch händische Steuerung nicht mehr optimal erfolgen. Für diese Aufgaben werden Gebäudeautomationssysteme eingesetzt.

2.1.1 Gebäudebetrieb und Automation

Die technische Umsetzung komplexer Gebäudefunktionen erfolgt mit Hilfe der Mess-, Steuer- und Regelungstechnik (MSR) bzw. der Gebäudeautomation (GA). Sie sind das Nervensystem des Gebäudes, das komplexe Regelstrategien für technische Anlagen ermöglicht. Durch die Entwicklung der digitalen Steuerungs- und Regelungstechnik mit Hilfe von Speicherprogrammierbaren Steuerungen (SPS) sowie der Einführung offener Bussysteme bis hin zu firmenneutralen Leitsystemen ist aus der Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik heute ein alle Gewerke umfassendes Automationssystem für Gebäude entstanden.

Die MSR-Technik ist Teil der Versorgungstechnik und bildet die Grundlage für die Automatisierung von Gebäudefunktionen. Ihre Überwachung ist wesentliches Ziel der in dieser Arbeit dargestellten Methodik. Die wichtigsten Begriffe, Benennungen und grafischen Symbole werden in DIN EN ISO 16484²¹, DIN 19226²² und DIN 19227²³ festgelegt.

Der Aufbau von Systemen der Gebäudeautomation wird durch DIN EN ISO 16484²⁴ „Systeme der Gebäudeautomation“ beschrieben. Sie basiert in Teilen auf der namensgleichen deutschen Richtlinie VDI 3814²⁵ sowie DIN V 32734:1992²⁶. Die einzelnen Teile, die zum Teil im Entwurf vorliegen, definieren unter anderem Hardware und Software sowie Funktionen, Anwendungen und Datenprotokolle. Sie beinhalten darüber hinaus eine umfassende Nomenklatur für die Gebäudeautomation.

Nach DIN EN ISO 16484-2 bezeichnet Gebäudeautomation die „Einrichtungen, Software und Dienstleistungen für automatische Steuerung und Regelung, Überwachung und Optimierung sowie die Bedienung und Management zum energieeffizienten, wirtschaftlichen und sicheren Betrieb der Technischen Gebäudeausrüstung“²⁷.

Zentrale Aufgaben der Automation sind die Steuerung und Regelung technischer Anlagen. Als **Steuer-/Regelstrecke** wird in der MSR-Technik die Anlage bzw. der Anlagenteil bezeichnet, dessen Größe gesteuert bzw. geregelt werden soll, einschließlich der Stellglieder. Eine Strecke kann zum Beispiel bei einer Raumtemperaturregelung neben dem Heizkreis mit Pumpe, Ventil, Rohrnetz und Heizkörper auch den zu beheizenden Raum umfassen.

Die **Steuer-/Regeleinrichtung** umfasst Sensoren, Regler und Stellantrieb, also bei der oben genannten Raumtemperaturregelung den Temperatursensor im Raum, den Regler, der die Funktion zur Berechnung der Ausgangsgröße enthält, sowie den Stellantrieb für die Beeinflussung des Stellglieds, in diesem Fall des Ventils.

Die MSR-Technik unterscheidet die Steuerung und die Regelung von Vorgängenⁱⁱ. Die **Steuerung** ist als Vorgang definiert, „bei dem eine oder mehrere Größen als Eingangsgrößen andere Größen als Ausgangsgrößen aufgrund der dem System eigentümlichen Gesetzmäßigkeit beeinflussen“²⁸, siehe Abbildung 2.

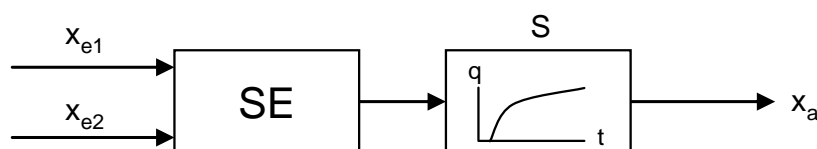


Abbildung 2 Wirkungsplan einer Steuerung²⁹

Die verursachenden Größen x_{e1} und x_{e2} wirken über die Steuereinrichtung SE auf eine Strecke S unter Beeinflussung der Ausgangsgröße x_a . Ein

ⁱⁱ Im Englischen wird für Steuerung (open loop) und Regelung (closed loop) der gemeinsame Oberbegriff „Control (loop)“ verwendet.

Beispiel ist ein Ventil in einem Heizkreis (S), das durch eine in der Steuereinrichtung (SE) definierten Funktion nach der Außenlufttemperatur (x_{e1}) gesteuert wird und so den Heizwassermassenstrom (x_a) beeinflusst. Die Steuerung erfolgt mit einem offenen Wirkungsweg über die Steuerkette. Die Ausgangsgröße *Massenstrom* hat keine Rückwirkung auf die Eingangsgröße *Außenlufttemperatur*.

Im Gegensatz zur Steuerung bezeichnet die **Regelung** einen Vorgang, „bei dem eine Größe, die Regelgröße (die zu regelnde Größe), erfasst, mit einer anderen Größe, der Führungsgröße, verglichen und im Sinne einer Angleichung an die Führungsgröße beeinflusst wird“³⁰, Abbildung 3.

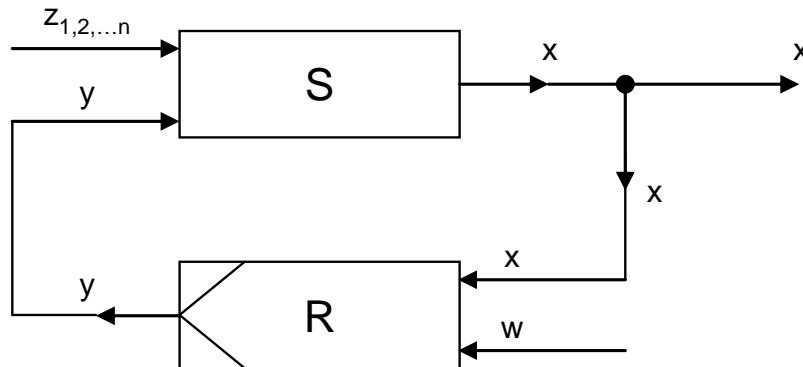


Abbildung 3 Wirkungsplan eines Regelkreises³¹

Auf der Regelstrecke (S) wird die Regelgröße (x) gemessen. Diese bildet gemeinsam mit der entsprechenden Führungsgröße (w), an die die Regelgröße angeglichen werden soll, die Eingangsgröße in den Regler (R). Im Regler ist die Funktion definiert, die aus Regel- und Führungsgröße die Stellgröße (y) ableitet und als Vorgabe an eine Stelleinrichtung in der Regelstrecke zu übergibt. Ein Beispiel hierfür ist die Regelung der Raumtemperatur, bei der die Regelgröße (x) gemeinsam mit der an einem Bediengerät als Führungsgröße (w) eingestellter Raumtemperatur in einem Regler (R) verarbeitet wird. Die ermittelte Stellgröße (y) wirkt auf das Ventil in der Rücklaufbeimischung bzw. auf die Vorlauftemperatur des Heizkreises und beeinflusst damit wiederum die Raumtemperatur. Die Regelung erfolgt in einem geschlossenen Wirkungsablauf bzw. Regelkreis, in dem sich die Regelgröße kontinuierlich selbst beeinflusst.

Mit Hilfe der MSR-Technik können technischen Anlagen in Gebäuden kontrolliert betrieben werden. Durch die Entwicklung der Informations- und Kommunikationstechnologien besteht heute die Möglichkeit, die entsprechenden Funktionen anlagenübergreifend in Gebäudeautomationssystemen (GA-Systeme) zu verknüpfen und zu überwachen.

2.1.1.1 Aufbau und Struktur

Der Aufbau der GA-Systeme wird üblicherweise in die Feld-, Automations- und Managementebene eingeteilt. Die Feldebene umfasst die gesamte Sensorik und Aktorik, also z.B. den Stellmotor einer Lüftungsklappe oder den Temperatursensoren im Vorlauf eines Heizkreises, siehe Abbildung 4.

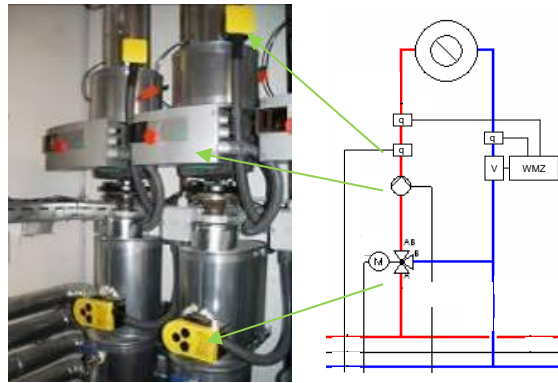


Abbildung 4 Sensorik (Temperatursensor) und Aktorik (Pumpe, Ventil) in einem Heizkreis

Die Bauteile der Feldebene werden über elektrische Leitungen an Klemmschienen in den Schaltschränken angeschlossen. Auf der Automationsebene werden die Signale der Sensorik zusammengeführt und in elektronischen Bausteinen (DDCⁱⁱⁱ) unter Verwendung von mathematischen und logischen Operationen verarbeitet. Die entsprechenden Ausgangssignale werden dann wiederum an die Aktorik gesendet. Feld- und Automationsebene können die Funktion technischer Anlagen autark gewährleisten. Entsprechend können hier auch Funktionen für einen energieeffizienten Betrieb der Anlagen angelegt werden.

Auf der übergeordneten Leit- oder Managementebene werden zum einen die Daten der unterschiedlichen Elemente der Automationsebene (in der Regel Schaltschränke bzw. Informationsschwerpunkte für Heizung, Lüftung, Kälte etc.) zusammengeführt. Gleichzeitig können von hier zentrale Vorgaben für alle Anlagen gemacht werden, also z.B. Zeitprogramme oder Soll- und Grenzwerte eingestellt werden, und auch Gewerke übergreifende Funktionen angelegt werden, siehe Abbildung 5.

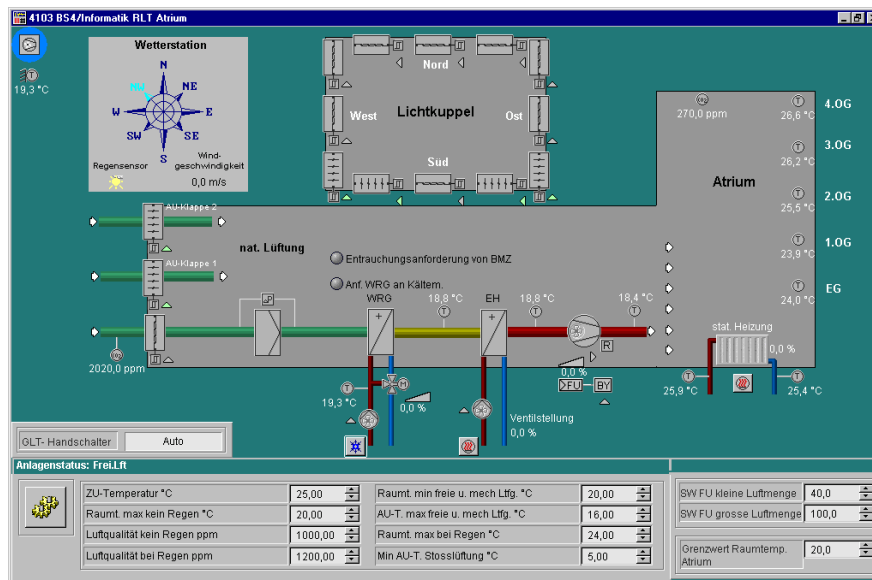


Abbildung 5 Anlagenvisualisierung mit dynamischen Einblendungen³²

ⁱⁱⁱ DDC: Direct Digital Control

2.1.1.2 Kommunikation in der Automation

Als Kommunikationssprachen der GA haben sich verschiedene, mittlerweile offene Standards durchgesetzt und Eingang in die Normung gefunden. Auf der Feldebene sind dies verschiedene Bus-Systeme wie LON (EN 14908³³) und EIB (EN 50090³⁴). Auf der Automationsebene dominieren BACnet³⁵ und Profibus (ENV 13321-2³⁶). Mit Hilfe dieser Bus-Systeme und Protokolle können Daten aus dem Gebäudebetrieb auch zwischen unterschiedlichen Systemen oder an Systeme außerhalb der Gebäudeautomation übergeben werden, z.B. an Energieinformationssysteme oder kaufmännische Software.

2.1.1.3 Funktionen und Funktionsbeschreibungen

Die Grundlage für die Planung, Ausschreibung und Vergabe der Leistungen für GA und MSR bildet die deutsche VDI 3814³⁷ und die entsprechende DIN EN ISO 16484³⁸. Sie beschreiben Begriffe und Systemgrundlagen und beinhalten Arbeitsgrundlagen für die Beschreibung entsprechender Anlagen und ihrer Funktionen.

Verarbeitungsfunktionen umfassen die Funktionen der mit der jeweiligen Automationssoftware in den Automationsstationen abgebildeten Operationen. Dies sind unter anderem das Überwachen, Steuerung und Regeln sowie das Ausführen von Berechnungen.

„*Managementfunktionen* werden genutzt, um Daten für Speicherung, Auswertung und Anzeige durch Anwendungsprogramme für Statistik und Datenanalyse zur Verfügung zu stellen“³⁹. Sie ermöglichen einen Austausch von Informationen zwischen der Automationsebene und der Managementebene sowie zwischen verschiedenen Systemen der Gebäudeautomation.

Mit der *Betriebsdatenspeicherung* können einzelne Befehle, Ereignismeldungen und Messwerte dauerhaft gespeichert werden. Dies kann entweder in festen zeitlichen Abständen oder bei Überschreiten vordefinierter Grenzwerte erfolgen.

Bedienfunktionen umfassen alle Mensch-System-Schnittstellen zur Visualisierung des Betriebs und zur Bedienung der Anlagen. Dies sind unter anderem statische Grafiken und Anlagenbilder, dynamische Einblendungen aktueller Betriebswerte, Ereignis-Anweisungstexte an den Bediener der Anlage sowie Nachrichten an externe Stellen z.B. die Weiterleitung eines Alarms an einen Telefonnotruf oder Email-Dienst⁴⁰.

Definiert werden darüber hinaus grafische Darstellungen von Anlagen, die unter anderem Anlagenteile, Datenpunkte und Regelstrukturen zeigen, sowie Datenpunktlisten in Tabellenform, die den vorgesehenen Datenpunkten die jeweiligen Verarbeitungsfunktionen zuordnen. Auf diese Weise kann in der Planung ein Mengengerüst der Funktionen und der notwendigen Leistungen erstellt werden (siehe auch 2.3).

In der Literatur werden zahlreiche Vorteile der Gebäudeautomation hinsichtlich eines energieeffizienten Betriebs von Gebäuden beschrieben. So können auf der Automationsebene Funktionen wie die Sollwert-Anpassung von Heizungsanlagen, Steuerungen für Lüftungs- und Klimaanlagen oder von Ereignissen abhängiges Schalten angelegt werden. Auf der Leitebene können neben Zeitschaltprogrammen auch ein Lastmanagement und zusätzliche Funktionen der Überwachung und Auswertung des Betriebs angelegt werden, die unter anderem eine Abrechnung des Energieverbrauchs ermöglichen.

DIN 15232⁴¹ systematisiert und quantifiziert Potenziale zur Energieeinsparung durch Funktionen von GA-Systemen. Dies bedeutet aber nicht, dass diese Potentiale in der Praxis auch tatsächlich genutzt werden.

2.1.2 Performanceverluste

Zahlreiche Forschungsprojekte und Studien haben in den letzten Jahren gezeigt, dass es mit den oben genannten Konzepten und Technologien tatsächlich möglich ist, energieeffiziente Gebäude sowohl in der Planung „zu rechnen“ als auch zu bauen⁴². Gleichzeitig wurde aber festgestellt, dass dies auf der einen Seite einen erheblichen Aufwand der Qualitätssicherung, Einregulierung und Betriebsoptimierung erfordert und dass, wenn dies nicht erfolgt, die Gebäude teilweise erheblich hinter den Zielwerten zurückbleiben.

Mansson⁴³ zeigte schon im IEA Annex 17 Energieeinsparpotenziale von 10-30% durch Betriebsoptimierung auf. Im Forschungsprojekt EVA zeigten Fisch und Plesser 2007 mehr als 50 einzelne Fehlfunktionen in modernen Bürogebäuden in Deutschland auf⁴⁴. Die Forschungsprojekte ModBen⁴⁵ und OASE⁴⁶ zeigten ähnliche Potentiale und Fehler. Eine Analyse von rund 150 einzelnen Betriebsfehlern in Demonstrationsgebäuden des Bundeswirtschaftsministeriums zeigte, dass ein erheblicher Teil der Fehler vollständig oder zum Teil von der Gebäudeautomation verursacht wurden⁴⁷. Franzke und Schiller⁴⁸ haben bei Untersuchungen von 125 Klimaanlagen nicht nur Einsparpotenziale von rund 30% berechnet, sondern auch festgestellt, dass nur rund 2% der Anlagen einer nach EnEV 2007⁴⁹ erforderlichen Energetischen Inspektion unterzogen worden waren.

Ursachen erhöhten Energieverbrauchs sind hier weniger bauliche Aspekte, sondern die Gebäude- und Anlagentechnik und insbesondere deren Automation. Ohne dieses Potenzial kausal zuzuordnen, entspricht die Größenordnung der in der Praxis identifizierten Einsparpotenziale mit 5-30 % in etwa den prognostizierten Einsparpotentialen der Automationskonzepte, wie sie etwa in DIN EN 15232⁵⁰ als *Gebäudeautomations-Faktoren* angegeben werden, oder wie der Arbeitskreis der Dozenten für Regelungstechnik für „Heizkosteneinsparungen bei Einfamilienhäusern“⁵¹ angibt. In der Konsequenz bedeutet dies, dass im Lebenszyklus von Gebäuden ein erhebliches Qualitätsrisiko für Investitionen in Energieeffizienz besteht.

2.1.3 Fazit

Die Entwicklungen der letzten 30 Jahre ermöglichen es heute, hocheffiziente Gebäude mit hohem Nutzerkomfort zu bauen. Die veränderten Konzepte und eingesetzten Technologien erfordern jedoch offensichtlich verbesserte Methoden der Qualitätssicherung, damit die in der Planung intendierten theoretischen Potenziale später auch über den gesamten Lebenszyklus genutzt werden.

2.2 Gebäude- und Anlagenfunktionen im Lebenszyklus

Zur Energieeffizienz von Gebäuden liegt ein umfangreiches Verordnungs-, Normen- und Richtlinienwerk vor, das Anforderungen, Vorgaben und Arbeitsmethoden für den gesamten Lebenszyklus definiert. Im Folgenden werden wichtige Regeln und Normen vorgestellt, die allgemein für die energieeffizienten Funktionen sowie im Speziellen für die Umsetzung der Gebäudeautomation und die Erstellung von Funktionsbeschreibungen von Bedeutung sind^{iv}.

^{iv} Anlagenspezifische Normen wie DIN EN ISO 13790:2008-09 für den Energiebedarf zur Heizung und Kühlung, DIN EN 13779:2007-09 und DIN EN 15241:2007-09 für Lüftungsanlagen oder DIN EN 15193:2008-03 für Beleuchtungsanlagen werden nicht im Einzelnen besprochen.

2.2.1 Leistungsphasen und Lebenszyklus

Der Lebenszyklus von Gebäuden umfasst alle Phasen von der Planung, Errichtung und Inbetriebnahme über die in der Regel längere Nutzungsphase bis zu Sanierung oder Rückbau. Die Voraussetzungen für einen effizienten und wirtschaftlichen Betrieb werden in den ersten Phasen bis zur Inbetriebnahme geschaffen. Der tatsächliche Energieverbrauch zum Betrieb des Gebäudes und ein Großteil der Lebenszykluskosten fallen dann in der Nutzungsphase an. Die beiden Abschnitte Planung/Errichtung/Inbetriebnahme und Betrieb/Nutzung sind jedoch in Deutschland insbesondere durch die Gestaltung der „Verordnung über die Honorare für Leistungen der Architekten und der Ingenieure“⁵² organisatorisch in starkem Maße voneinander getrennt.

Die HOAI macht Vorgaben über Entgelte für Leistungen, „soweit sie durch Leistungsbilder oder anderen Bestimmungen dieser Verordnung erfasst werden“⁵³. Die Leistungsbilder werden nach Leistungsphasen mit ihren Inhalten beschrieben. So enthält Teil II der HOAI die Beschreibung von 9 Leistungsphasen von der Grundlagenermittlung (1) bis zur Objektbetreuung und Dokumentation (9)⁵⁴.

In Bezug auf den Gebäudebetrieb und die Gebäudeautomation ist Teil IX, „§ 73 Leistungsbild Technische Gebäudeausrüstung“ von Bedeutung. In Phase 2 „Vorplanung“ werden Untersuchungen für die Gebäude- und Anlagenoptimierung und das „Aufstellen eines Funktionsschemas beziehungsweise Prinzipschaltbildes für jede Anlage“⁵⁵ gefordert. Untersuchungen zum Gebäude- und Anlagenoptimierung sind besondere Leistungen mit dem expliziten Verweis auf Energieverbrauch und Energiekonzepte. Eine Weiterführung dieses Aspekts erfolgt in Phase 3 „Entwurfsplanung“ mit den Besonderen Leistungen „Erarbeiten von Daten für die Planung Dritter, zum Beispiel für die zentrale Leittechnik“⁵⁶.

Diesem Hinweis auf die Notwendigkeit von Funktionsbeschreibungen folgt keine explizite Vorgabe für die Berücksichtigung von Funktionen in der Ausführungsplanung, Ausschreibung oder Vergabe. Erst in Phase 8 „Objektüberwachung/ Bauüberwachung“ ist dann die Qualitätssicherung durch Aufmaß, fachtechnische Abnahmen und die Feststellung von Mängeln bis zur Übergabe des Gebäudes verankert. Das „Durchführen von Leistungs- und Funktionsmessungen“ ist als *Besondere Leistung* definiert.⁵⁷

Leistungsphase 9 „Objektbetreuung und Dokumentation“ erstreckt sich über den Gewährleistungszeitraum bis zu fünf Jahre nach der Übergabe des Gebäudes und beinhaltet das Überwachen der Beseitigung von Mängeln und die „systematische Zusammenstellung der zeichnerischen Darstellungen und rechnerischen Ergebnisse des Objekts“. Hier sind Maßnahmen zur Qualitätssicherung in Form von Wartungsplanung und der ingenieurtechnischen Kontrolle des Energieverbrauchs und der Schadstoffemissionen“ definiert.⁵⁸

Die HOAI beschreibt naturgemäß keine konkreten Methoden oder Arbeitsmittel für die Umsetzung dieser Leistungen. Grundsätzlich sind die Anforderungen an die Beschreibung funktionaler Qualitäten und ein entsprechender Prozess der Qualitätssicherung aber in den Leistungsbildern der HOAI einschließlich der Besonderen Leistungen bereits enthalten.

Der Auftragnehmer hat bei der Abnahme aktualisierte Unterlagen zur Dokumentation an den Auftraggeber zu übergeben. Dies sind nach DIN 18386 (VOB – Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen, Teil C) unter anderem Regelschemata, Funktionsbeschreibungen und projektspezifische Programme und Daten auf Datenträgern⁵⁹. Die Unterlagen sollen dem Auftraggeber spätestens bei Abnahme übergeben werden⁶⁰. Die Vorgaben für die Gebäudeautomation sind eng verknüpft mit den Forderungen anderer Teile der VOB Teil C wie etwa für die Abnahme

raumluftechnischer Anlagen nach ATV DIN 18379⁶¹, die ebenfalls Vorgaben für die Ausführung und Abnahme von Einrichtungen der MSR und der GA machen.

Die Leistungen im Facility- bzw. Gebäudemanagement sind nicht über eine Honorarordnung festgelegt. Leistungen und Kostenstrukturen sind jedoch in Normen definiert. Diese umfassen im Technischen Gebäudemanagement unter anderem die Instandhaltung, das Betreiben und das Energiemanagement.

Wartungsvorgaben für Anlagen und seit kurzem auch Vorgaben der Energieeinsparverordnung für regelmäßige Inspektionen bilden eine gewisse Brücke zwischen Planung und Betrieb.

2.2.2 Planung

Für die Planungsphase werden im Folgenden vier zentrale Verordnungen und Richtlinien in Bezug auf die Energieeffizienz vorgestellt. Die Energieeinsparverordnung EnEV 2009⁶² ist die zentrale Verordnung zur Energieeffizienz in der Planung und definiert Standards für die Energieeffizienz und den sommerlichen Wärmeschutz ganzer Gebäude. DIN EN 15232⁶³ beschreibt den Einfluss einzelner Gebäudeautomationssysteme auf die Effizienz gebäudetechnischer Anlagen. Aufbau und Funktionen von Automationssystemen werden in der bereits oben genannten DIN EN ISO 16484 dargestellt. DIN 18299⁶⁴ und DIN 18386⁶⁵ definieren die Vergabe- und Vertragsbedingungen für diese Systeme.

2.2.2.1 EnEV 2009 und DIN V 18599

Die Energieeinsparverordnung EnEV definiert Grenzwerte und Mindestanforderungen für energetisch relevante Größen von Gebäuden wie den Jahres-Primärenergiebedarf, Transmissionswärmekoeffizienten der Gebäudehülle oder den sommerlichen Wärmeschutz. Der Nachweis der Einhaltung ist in der Regel im Zuge des Bauantrags und bei Fertigstellung zu erbringen.

Mit Hilfe eines monatlichen Verfahrens zur Berechnung des jährlichen Energiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Beleuchtung, Trinkwarmwasser und Hilfsenergien nach DIN V 18599:2011-12⁶⁶ wird ein Kennwert für den flächen- bzw. volumenbezogenen Jahres-Primärenergie des Gebäudes berechnet. Dabei werden grundsätzliche Arten und Standards der technischen Ausstattung festgelegt, wie die Art der Wärmeversorgung, der Grad der mechanischen Belüftung und der Beleuchtungstyp. Der mit diesen Annahmen berechnete Kennwert für den Jahres-Primärenergiebedarf muss den eines Referenzgebäudes gleicher Geometrie und Nutzung mit allgemein festgelegten technischen Qualitäten unterschreiten. Die Berechnung enthält zahlreiche Annahmen für die Nutzung des Gebäudes – sogenannte Nutzungsprofile – wie Betriebszeiten, System- und Raumtemperaturen, Anlagendrücke etc. Auch unterschiedliche Regelungsstrategien können berücksichtigt werden.

Mit dem „EnEV-Nachweis“ werden in jedem Projekt umfangreiche Daten zum Gebäude, seinen technischen Anlagen und Funktionen frühzeitig definiert und in Berechnungen verwendet. Einige der unter 2.1.2 genannten Veröffentlichungen haben große Unterschiede zu den späteren Energieverbräuchen gezeigt. Dies deutet auf Abweichungen zwischen den Annahmen in der Planung und den tatsächlichen späteren Betriebsbedingungen hin. Die EnEV enthält hierzu auch Vorgaben für die Inbetriebnahme technischer Anlagen (§13) sowie die „Aufrechterhaltung der energetischen Qualität“ (§11) und für „Energetische Inspektionen von Klimaanlage“ (§12), die unten besprochen werden.

Für die Erstellung von EnEV-Nachweisen und Berechnungen nach DIN V 18599 liegen zahlreiche Softwareprodukte am Markt vor. Mit diesen

können in der Regel alle erforderlichen Daten eingegeben, die Berechnungen durchgeführt und die entsprechenden Unterlagen erstellt werden.

2.2.2.2 DIN EN 15232: Einfluss der Gebäudeautomation und des Gebäudemanagements

Teil 11 der DIN V 18599:2011-12 zur Berücksichtigung von Regelungsstrategien orientiert sich weitgehend an DIN EN 15232:2007-11 „Energieeffizienz von Gebäuden – Einfluss der Gebäudeautomation und des Gebäudemanagements“⁶⁷. Sie definiert „Konventionen und Verfahren zur Abschätzung der Auswirkungen von Gebäudeautomationssystemen (GA-Systeme) und Maßnahmen des technischen Gebäudemanagements“⁶⁸. Für die Planung von Gebäuden und Anlagen definiert sie unter anderem ein vereinfachtes Verfahren zur Bewertung der energetischen Wirkung von Automationsfunktionen und Maßnahmen des Gebäudemanagements. Mit Hilfe von sogenannten *GA-Effizienzklassen* werden vier Kategorien von D (geringe Energieeffizienz) bis A (hohe Energieeffizienz) für die Energieeffizienz einzelner Anlagen mit entsprechenden Automationsstandards definiert. Die Summe aus Energiebedarf und Anlagenverlusten des Referenzstandards für Gebäude oder Anlagen (Kategorie C) werden mit dem GA-Faktor der tatsächlich vorliegenden Kategorie multipliziert, um die tatsächliche *Bezugsenergie* zu berechnen. Hilfsenergie und Beleuchtungsenergie werden separat mit entsprechendem Vorgehen berechnet.

Zur Anwendung sind im Anhang der Norm Formulare in der Art von Checklisten für einzelne Anlagen und Funktionen definiert. Diese werden auch zur Anwendung bei energetischen Inspektionen empfohlen.

2.2.2.3 VOB Teil C

Die VOB Teil C „Allgemeine Technische Vertragsbedingungen für Bauleistungen (ATV) Gebäudeautomation - DIN 18386“⁶⁹ ergänzt die DIN 18299⁷⁰ „Allgemeine Regeln für Bauarbeiten jeder Art“ und beschreibt unter Bezug auf die VDI 3814⁷¹ die Vertragsbedingungen für die Umsetzung von Gebäudeautomationssystemen. Zur Ausführung der Anlagen wird in ATV DIN 18386, 3.1.1 gefordert, dass „die Einrichtungen und Anlagen der Gebäudeautomation (...) mit den technischen Anlagen so aufeinander abzustimmen (sind), dass die geforderte Funktion erbracht, die Betriebssicherheit gegeben und ein sparsamer und wirtschaftliche Betrieb möglich sind.“⁷²

Die Liste der Grundlagen, die Auftraggeber und Auftragnehmer vor Beginn der Ausführung bereitzustellen haben, zeigen die enge Verzahnung der Leistungen aus Planung und Ausführung. So hat der Auftragnehmer vor Beginn der Montage unter Anderem Montagepläne, Regelschemen mit Darstellung der wesentlichen Automationsfunktionen und Funktionsbeschreibungen zu erarbeiten und mit dem Auftraggeber abzustimmen. Im Kommentar zur VOB C heißt es dazu, dass es sich dabei um „ergänzende planerische Leistungen handelt, die auf den Planungsvorgaben, Berechnungen und Ausführungsplänen des Auftraggebers aufbauen“⁷³ und betont die Notwendigkeit einer über alle Projektphasen hinweg sorgfältigen Planung und Ausführung mit dem Ziel eines ganzheitlichen Konzepts.

Hinsichtlich der Inbetriebnahme und Einregulierung verweist der Kommentar zur VOB⁷⁴ auf die Problematik fehlender Lasten, z.B. bei Inbetriebnahme einer Heizungsanlage im Sommer, und fordert die Einstellung auf Basis von Erfahrungswerten und eine spätere Optimierung. Die Abnahme soll generell erst nach der endgültigen Einregulierung der Anlage vorgenommen werden, weshalb empfohlen wird, die Abnahme in Vollständigkeitsprüfung und Funktionsprüfung zu gliedern und letztere bei Bedarf zu einem späteren Zeitpunkt als Schlussabnahme durchzuführen: Ist zu erwarten, „dass eine betriebsfertige Anlage nicht unmittelbar nach Fertigstellung auf Ihre Vertragsmäßigkeit geprüft werden kann (...), so sind beson-

dere Vereinbarungen zwischen Auftraggeber und Auftragnehmer zu treffen⁷⁵. Die Gewährleistung und der Gefahrenübergang treten jedoch bereits nach der Vollständigkeitsprüfung in Kraft.

2.2.2.4 DIN EN ISO 16484: Systeme der Gebäudeautomation

Teil 1 der DIN EN ISO 16484 legt „die wesentlichen Tätigkeiten und Entscheidungen fest, die zur Durchführung eines Projekts in den verschiedenen Phasen“⁷⁶ bei der Errichtung eines Gebäudeautomationssystems erforderlich sind. Dies umfasst die Planung, die technische Bearbeitung, die Installation, Abschluss und Dokumentation sowie Schulung und die Überprüfung und Verbesserung der funktionalen Gebäudequalität, Abbildung 6.

Projektphase	Leistungen	Ergebnis
Planung	Definition der Projektanforderungen Projektplanung und –organisation Technische Spezifikation	→ Auftrag
Technische Bearbeitung	Projektiertung und Koordination Detaillierte Auslegung der Funktion und der Hardware Hardware-Konfiguration Konfiguration der automationsstrategien Konfiguration der Management- und Bedienfunktionen	→ Genehmigung Werkpläne → Werkssystemtest
Installation	Montage Inbetriebnahme durch GA-System-Lieferanten	
Abschluss	Probebetrieb Bedienereinweisung Übergabe Fertigstellung, Restarbeiten	→ Abnahme → Projektabschluss

Abbildung 6 Prozessschritte für die Durchführung eines GA-Projekts nach DIN EN ISO 16484⁷⁷

Das Prozesskonzept ist sehr umfassend dargestellt und beschreibt neben technischen auch organisatorische Anforderungen in Bezug auf das Facility Management und den späteren Nutzer. Im Kontext dieser Arbeit sind besonders die Definition von funktionalen Anforderungen in der Planung – Projektanforderungen (Abschnitt 5.2.2.1) und die technischen Spezifikationen (5.2.4) sowie deren Überprüfung in der Abnahmephase (5.5) von Bedeutung. Neben physikalischen und nutzungsbedingten Anforderungen wird die Energieeffizienz als besonderes Ziel definiert. Am Ende der Planungsphase steht der Auftrag (5.2.5), der die technischen Spezifikationen enthalten soll. Es fällt auf, dass, obwohl „die Beschreibung der Projektanforderungen (...) vom Kunden genehmigt werden“⁷⁸ muss und die Spezifikationen im Auftrag enthalten sein sollen, keinerlei weitere Ausführungen zu Inhalt und Form dieser Festlegungen erfolgt.

2.2.3 Errichtung, Abnahme und Inbetriebnahme

Es gibt zahlreiche Methoden und Werkzeuge, die der Untersuchung eines Gebäudes und seiner Anlagen oder des Gebäudebetriebs dienen. Diese Prüfmethode(n) (engl.: FPT - Functional Performance Tests) werden in Normen und Richtlinien sowie zahlreichen Veröffentlichungen beschrieben und in einigen Fällen auch als Abnahmevoraussetzung für Bauleistungen gefordert. Hierzu gehören unter anderem Luftdichtheitstests der Gebäudehülle (Blower-Door-Test) nach DIN EN 13829⁷⁹, Thermografieaufnahmen von Gebäuden oder Messungen der spezifischen Ventilatorleistung von Lüftungsanlagen nach DIN 13779⁸⁰. Im Folgenden sind einzelne Vorgaben und Methoden erläutert.

DIN EN ISO 16484 schließt den Projektprozess für Gebäudeautomationsysteme mit der Inbetriebnahme und Abschlussphase ab. In Bezug auf die geplanten Leistungen wird in der Inbetriebnahmephase⁸¹ eine Überprüfung der Automationsstrategien sowie der Management- und Bedienfunktionen gefordert. Die Prüfungen umfassen unter anderem die Wirkungsweise von Datenpunkten sowie das statische und dynamische Verhalten von Regelkreisen und zeitabhängige Funktionen. Darüber hinaus werden auch die Funktionen der verschiedenen Schnittstellen – grafische Anzeigen, Datenaufzeichnung etc. – überprüft.

In der Abschlussphase erfolgt eine sogenannte *Systemvorführung*⁸². Hier soll dem Kunden in vereinbarten Stichproben gezeigt werden, dass die Systeme vollständig sind und die geplanten Wirkungsweisen umgesetzt wurden. Dazu können tatsächliche, aber auch simulierte oder erzwungene Bedingungen verwendet werden.

An dieser Stelle werden die oben angesprochenen Defizite aus der Planung offensichtlich. Die Abnahme muss durch den Kunden bzw. seinen Vertreter erfolgen. Dieser muss also in die Lage versetzt werden, Umfang und Qualität der umgesetzten Leistungen in Bezug auf die geschuldeten Leistungen zu prüfen. Auch hier werden keine konkreten Vorschläge zu sinnvollen Darstellungsformen gemacht.

2.2.3.1 Abnahmeprüfungen

Der Errichter bittet für Abschluss, Nachweis und Anerkennung seiner Bauleistung um Abnahme durch den Bauherrn bzw. dessen Fachplaner. Das Abnahmeverfahren ist in VOB Teil C geregelt. Für die einzelnen Gewerke gibt es detaillierte Normen und technische Richtlinien. So ist beispielsweise nach VOB Teil C für Lüftungsanlagen eine Abnahmeprüfung nach DIN EN 12599⁸³ "Lüftung von Gebäuden - Prüf- und Messverfahren für die Übergabe eingebauter raumluftechnischer Anlagen" durchzuführen. Sie definiert „Prüf- und Messverfahren für die Übergabe eingebauter raumluftechnischer Anlage“⁸⁴ in Nicht-Wohngebäuden. Die Abnahmen sind einmalige und zeitlich begrenzte Prüfungen. Ziel ist die Feststellung der Gebrauchstauglichkeit der Anlage durch Vollständigkeitsprüfungen sowie Funktionsprüfungen und –messungen. Letztere werden für Zentralgeräte und für Räume definiert. Festgestellt werden dabei der ordnungsgemäße Einbau und die Wirksamkeit einzelner Bauteile (Prüfungen) sowie die Erbringung der vorgegebenen Bedingungen und der entsprechenden Sollwerte wie Stromaufnahme des Motors, Zu-/Abluft(volumen)strom oder Lufttemperaturen.

Die anzuwendenden Messmethoden, ihr Umfang und Messunsicherheiten werden beschrieben. Die „Überprüfung von „Regelungs-, Steuerungs- und Schaltsystemen“ wird im Abschnitt „Sonderprüfungen“ beschrieben und umfassen den Wirksinn von Stellgliedern, Sollwerte und Führungsregelungen. Hierzu werden teilweise Grenzwerte für die Bewertung der Mess-

ergebnisse definiert.

Hinsichtlich der in dieser Arbeit entwickelten Methodik fällt auf, dass die Norm nur wenige Vorgaben für die konkrete Anwendung im Abnahmeprozess macht und die Bedeutung der einzelnen Messungen und Methoden nicht priorisiert werden. Entsprechend scheint der hohe technische Detaillierungsgrad nur bedingt mit den praktischen Möglichkeiten in einem Bauprojekt und den Risiken für einen möglicherweise erhöhten Energieverbrauch zu korrespondieren.

Neben der Überprüfung von Anlagen sind auch messtechnische Analysen des Innenraumklimas eines Gebäudes möglich. Messungen nach DIN EN ISO 7730⁸⁵ können insbesondere Fehler in der Belüftung, Heizung und Kühlung von Räumen feststellen, indem Messwerte mit normierten Grenzwerten, Referenzwerten aus anderen Gebäuden oder vertraglich vereinbarten Zielwerten verglichen werden. Kuchen⁸⁶ hat hierzu in seiner Dissertation mit dem „Spot-Monitoring für Bürogebäude“ ein entsprechendes Verfahren vorgestellt. Gossauer⁸⁷ hat ein Analyseverfahren für die Evaluierung des Innenraumklimas und der Nutzerzufriedenheit durch Befragungen entwickelt.

2.2.3.2 Inbetriebnahmemanagement

In VOB Teil C „Allgemeine Technische Vertragsbedingungen für Bauleistungen (ATV) Gebäudeautomation - DIN 18386“⁸⁸ heißt es zur Inbetriebnahme von Gebäudeautomationsanlagen unter anderem: „Die Einrichtungen und Anlagen der Gebäudeautomation [sind] mit den technischen Anlagen so aufeinander abzustimmen (...), dass die geforderte Funktion erbracht, die Betriebssicherheit gegeben und ein sparsamer und wirtschaftliche Betrieb möglich sind“⁸⁹. Anlagen funktionieren also nicht „plug&play“, sondern sind abzustimmen auf die umgesetzten Gewerke und auf die jeweilige Nutzung – und entsprechend können sie auch fehlerhaft betrieben werden.

Der Prozess der Inbetriebnahme hat hierbei im angelsächsischen Raum eine eigenständigere Bedeutung als in Deutschland. Da die bei uns tradierte Position des Fachplaners mit seinen umfangreichen Leistungsbildern nach HAOI weitgehend auf die Planung und Errichtung des Gebäudes beschränkt ist und kaum Brücken in den Betrieb vorhanden sind, sind Abnahme und Inbetriebnahme innerhalb von Projekten zumeist nicht der Start einer erfolgreichen Betriebsphase, sondern der Abschluss eines hoffentlich noch wirtschaftlichen Planungs- oder Realisierungsprozesses. Seit Juni 2011 liegt als deutsche Entsprechung zum Commissioning die VDI 6039 „Inbetriebnahmemanagement für Gebäude“⁹⁰ vor. Sie ist sicherlich auch eine Reaktion auf die Entwicklungen innovativer Gebäudekonzepte:

„Die steigende Komplexität der Projekte, die oft geforderte »räumliche Integrität« der eingebauten Systeme und Komponenten in Verbindung mit dem Wunsch der Auftraggeber und Nutzer nach Betriebseffizienz und individueller Regelbarkeit bedingen zudem, dass die ingenieurtechnische Bearbeitung der Einzelgewerke viel umfassender und die Koordination der Einzelgewerke mit den anderen am Bau beteiligten Partnern und Gewerken viel frühzeitiger einsetzen müssen, als bisher meist praktiziert“⁹¹.

Deshalb beschreibt die Richtlinie „Methoden und Vorgehensweisen“ zur Inbetriebnahme von Anlagen der technischen Gebäudeausrüstung. Zentraler Akteur ist hier ein Inbetriebnahmemanager (IBM), der nicht nur Abnahmen plant, koordiniert sowie den Zustand und die Funktion von Anlagen feststellt, sondern der auch Anforderungen des Bauherrn definieren und Mängel rügen kann. Insbesondere bei komplexen Gebäuden mit gewerkeübergreifenden Funktionen soll der IBM die Aufgaben der Fachplaner unterstützen.

2.2.4 Betrieb

Das Gebäudemanagement oder Facility Management ist verantwortlich für die Betriebsführung von Gebäuden. Strukturen und Aufgaben des Gebäudemanagements werden in mehreren Normen und Richtlinien beschrieben. DIN 32736⁹² beschreibt Leistungsbilder des Gebäudemanagements, DIN 18960⁹³ legt entsprechend den Baukosten nach DIN 276⁹⁴ eine Struktur der Betriebskosten mit einzelnen Kostenarten in mehreren Detaillierungsstufen fest. Eine umfassende Beschreibung der Aufgaben des Gebäudemanagements wurde auch in der Richtlinienreihe der GEFMA – Deutscher Verband für Facility Management erarbeitet.

Der Bereich des Facility Managements definiert sich nach GEFMA 100 sehr umfassend wie folgt: "Facility Management (FM) ist eine Managementdisziplin, die durch ergebnisorientierte Handhabung von Facilities und Services im Rahmen geplanter, gesteuerter und beherrschter Facility Prozesse eine Befriedigung der Grundbedürfnisse von Menschen am Arbeitsplatz, Unterstützung der Unternehmens-Kernprozesse und Erhöhung der Kapitalrentabilität bewirkt. Hierzu dient die permanente Analyse und Optimierung der kostenrelevanten Vorgänge rund um bauliche und technische Anlagen, Einrichtungen und im Unternehmen erbrachte (Dienst-)Leistungen, die nicht zum Kerngeschäft gehören."⁹⁵

Aber auch die oben genannte Energieeinsparverordnung 2007, die in den vorherigen Versionen auf die Planung und Errichtung begrenzt war, macht seit 2007 konkrete Vorgaben für den Betrieb.

2.2.4.1 Energieeinsparverordnung und Energetische Inspektionen

Für die Betriebsphase verordnet die EnEV 2007 in §11⁹⁶, dass sowohl Außenbauteile wie auch technische Anlagen sachgerecht zu bedienen sind. Sie dürfen nicht verändert werden, „soweit sie zum Nachweis der Anforderungen energieeinsparender Vorschriften des Bundes zu berücksichtigen waren“. Entsprechend dürfen z.B. im Nachweis angenommene Wirkungsgrade in der Errichtung und im Betrieb nicht gemindert werden.

EnEV 2007 §§16-21⁹⁷ regeln die Ausstellung und Verwendung sogenannter Energieausweise, in denen die energetischen Qualitäten dokumentiert werden. Diese können sowohl auf Basis von Planungs- oder Dokumentationsunterlagen berechnet als auch auf Basis von Verbrauchsmessungen dargestellt werden. Für öffentliche Gebäude besteht eine Pflicht zum Aushang.

§12 EnEV fordert im Betrieb sogenannte energetische Inspektionen für Klimaanlageanlagen. Alle 10 Jahre müssen „Klimaanlagen mit einer Nennleistung für den Kältebedarf von mehr als zwölf Kilowatt“⁹⁸ inspiziert werden. Entsprechende Nachweise sind den Behörden auf Verlangen vorzulegen.

Für die Inspektion von Lüftungs- und Klimaanlageanlagen liegen die DIN EN 15239⁹⁹ und 15240¹⁰⁰ vor. Sie definieren den Umfang der Inspektionen mit visuellen und messtechnischen Prüfungen der Zentralgeräte, Verteilungen sowie der Luftwechsel in Räumen und auch der Luftdichtheit des Gebäudes. Die Prüfungen umfassen unter anderem Vollständigkeit, Sauberkeit, Stand der Wartung, Wirkungsgrade und regelungstechnische Funktionen. Entsprechend beider Normen soll zu jeder Inspektion ein Bericht erstellt werden, der auch Verbesserungsvorschläge macht. Konkrete Anleitungen zur Durchführungen werden in Form von Checklisten gegeben.

Energetische Inspektionen sind ab dem 1. Oktober 2011 für alle betroffenen Klimaanlageanlagen durchzuführen. Alle Anlagen, die vor dem 1.12.1995 errichtet wurden, mussten entsprechend zu diesem Zeitpunkt einer Energetischen Inspektion unterzogen worden sein. Eine Feldstudie von Franz-

ke und Schiller¹⁰¹ aus dem Jahr 2011 zeigte, dass zum einen ein Einsparpotenzial von im Mittel rund 30% in den Bestandsanlagen, bundesweit rund 3,5 TWH/a erreicht werden kann. Das Einsparpotenzial entspricht dem zahlreicher Forschungsprojekte und Feldstudien für Gebäude und Anlagen. Zum anderen wurde festgestellt, dass vermutlich nur rund 2% der betroffenen Anlagen tatsächlich inspiziert worden waren. Es fehlt hier nach Einschätzung der Autoren auch an dem Willen der entsprechenden Behörden zur Durchsetzung der Inspektionen (den Autoren der Studie ist kein Fall bekannt!).

2.2.4.2 Gebäudemanagement nach DIN 32736

Eine umfassendere Strukturierung entlang der Leistungsbilder des Kaufmännischen, Technischen und Infrastrukturellen Gebäudemanagements definiert DIN 32637¹⁰² "Gebäudemanagement". Innerhalb der DIN 32736 wird der Leistungsblock "Energie-Management" dem Technischen Gebäudemanagement zugeordnet und differenziert in folgende Leistungen (DIN 32736):

- „Gewerke-übergreifende Analyse der Energieverbraucher
- Ermitteln von Optimierungspotentialen
- Planen der Maßnahmen unter betriebswirtschaftlichen Aspekten
- Berechnen der Rentabilität
- Umsetzen der Einsparungsmaßnahmen
- Nachweisen der Einsparungen.“¹⁰³

Damit sind die originären Aufgaben des Energiemanagements als Teilleistungen dem Facility Management zuzuordnen. Die oben dargestellten Aufgaben machen keine detaillierten Vorgaben zur Umsetzung des Leistungsbilds *Energie-Management*. So wird z.B. nicht präzise festgelegt, nach welcher Methodik eine Analyse durchzuführen ist, wann und wie Optimierungspotenziale zu bestimmen sind und wie der Erfolg von Maßnahmen zu überprüfen ist.

2.2.4.3 Energiemanagement nach GEFMA 124

Eine umfassende Beschreibung des Energiemanagements als Prozess mit dem Gebäude als Bezugsrahmen und entsprechend als Teil des Facility Managements bietet die GEFMA-Richtlinie 124 „Energiemanagement“^v (EM): „Ein wesentliches Ziel des EM besteht darin, die Gesamtkosten für den Prozess der Energiebereitstellung, -verteilung und -anwendung im Gebäude (Bezeichnung hier: Prozesskosten) bei einem definierten Level der Nutzungsqualität zu minimieren“¹⁰⁴. Die Richtlinie bezieht sich dabei auf den gesamten Lebenszyklus und beschreibt in Teil 1 die Einführung eines EM-Prozesses bei Neu- und Bestandsbauten. Zur Prüfung von Investitionen sind demnach folgende Daten erforderlich:

- „Rechnungen und Verbrauchswerte von Wärme, Kälte, Strom und Wasser
- Nutzbares Potenzial an Abwärme und Abkälte
- Bestandsunterlagen zur Bewertung von Gebäude und Technik
- Planungsunterlagen, Auslegungsdaten, Spezifikationen
- Lieferverträge und Einkaufskonditionen zur Organisationsbewertung
- Wartungsverträge und Reparaturabrechnungen zur Instandhaltungsbewertung
- Sollwerte und Messwerte von physikalischen Parametern zur Funktionsbewertung“¹⁰⁵.

^v Die Teile 124-3 „Berufsbilder(Einsatzfelder) im Energiemanagement“ und 124-4 „Qualifizierung von Beratern für das Energiemanagement“ sind noch nicht veröffentlicht.

Für den Prozess eines kontinuierlichen Energiemanagements im Gebäudetrieb werden verschiedene Vertiefungsstufen und Leistungsbilder wie die Prüfung der Energiekosten definiert.¹⁰⁶

In GEFMA Richtlinie 124-2¹⁰⁷ werden einzelne Methoden beschrieben, die in den verschiedenen Stufen des in Teil 1 dargestellten Prozesses zur Anwendung kommen können. Dabei werden zunächst Begriffe und Methoden wie Energiekonzept, Energiebilanz, Benchmark, Nutzwertanalyse und Energiecontrolling mit Bezügen zu anderen Normen und Richtlinien definiert oder Darstellungsweisen für Energieflüsse beschrieben, der jeweilige Zweck erläutert und Vorgaben für die Anwendung gemacht.

Konkrete technische Vorgehensweisen zur Optimierung der Energieeffizienz von Gebäuden beschränken sich auf die Nennung von Einzelmaßnahmen wie den hydraulischen Abgleich von Heizungssystemen, das Lastmanagement für den Strom- und Wärmebezug sowie die allgemeine Anlagenoptimierung: „Unter Anlagenoptimierung ist die Auswahl und Einstellung optimaler Betriebsparameter an gebäudetechnischen Anlagen zu verstehen. Das Ziel besteht in der Senkung des Energieverbrauchs bzw. des Leistungsbezugs“¹⁰⁸. Die Anlagenoptimierung wird am Beispiel der Optimierung einer Heizungsanlage dargestellt. An dieser Stelle wird auch ein Bezug zur Gebäudeautomation hergestellt, die für die Erfassung von Betriebsdaten genutzt werden soll.

2.2.4.4 Energiemanagement nach DIN EN 16001

Ziel der DIN EN 16001 ist es, „Organisationen beim Aufbau von Systemen und Prozessen zur Verbesserung ihrer Energieeffizienz zu unterstützen“¹⁰⁹. Sie bezieht sich methodisch, wie auch die DIN EN ISO 14001, explizit auf den PDCA-Zyklus (Plan-Do-Check-Act), der in den 80er Jahren von William Edward Deming als Prozess zur Qualitätsverbesserung in der Industrie eingeführt wurde¹¹⁰. DIN EN 16001 ist an DIN EN ISO 14001 und EMAS (siehe 2.2.4.5) angelehnt und kann diese ergänzen.

DIN EN 16001 beschreibt die methodischen Anforderungen an ein Energiemanagementsystem entlang der Phasen des PDCA-Zyklus, angefangen von der Integration des Energiemanagements im Unternehmen über die Entwicklung von Zielsetzungen und Strategien zur Umsetzung bis zur Kommunikation und Dokumentation sowie der Überprüfung von Zielen.



Abbildung 7 PDCA-Zyklus nach DIN EN 16001, Leitfaden Umweltbundesamt¹¹¹

Die Norm verweist jedoch auf keinerlei konkrete Mittel zur Umsetzung der Methoden, sondern beschränkt sich ausschließlich auf die Beschreibung der Methodik. Praktische Umsetzungsbeispiele sind im Leitfaden für Unternehmen und Organisationen „DIN EN 16001: Energiemanagementsysteme in der Praxis“¹¹² des Bundesumweltamtes dargestellt.

In 2011 wurde eine international einheitliche Norm für Energiemanagementsysteme als ISO 50001 eingeführt¹¹³.

2.2.4.5 Umweltmanagement nach EMAS und DIN EN ISO 14001

EMAS, das „Eco-Management and Audit Scheme“ definiert seit 1993 Umweltmanagementsysteme für Organisationen. Grundlage ist die Verordnung des Europäischen Parlaments und des Rates vom 25.11.2009, nach der Organisationen „zur freiwilligen Teilnahme an EMAS angeregt“ (Artikel 8).¹¹⁴ Die Teilnahme kann durch Informationen, Fördermittel oder öffentliche Einrichtungen unterstützt werden. „Zentraler Bestandteil von EMAS ist die internationale Umweltmanagementnorm DIN EN ISO 14001“¹¹⁵. EMAS und DIN EN ISO 14001¹¹⁶ verfolgen das Ziel eines guten Umweltmanagements in Organisationen. EMAS verwendet dabei die Norm als Managementsystem, geht aber unter anderem durch seinen rechtlichen Status (Verordnung des Europäischen Parlaments und des Rates), die Prüfung gesetzlicher Konformität, eine Verpflichtung zur Veröffentlichung, die Verpflichtung zu einem kontinuierlichen Verbesserungsprozess sowie die Verpflichtung zur Durchführung der Zertifizierung durch einen unabhängigen Auditor über die Norm hinaus. Ausgehend von einer Umweltprüfung werden Ziele und Maßnahmen in einem Umweltprogramm definiert, zu deren Erreichung ein Managementsystem mit personellen Verantwortlichkeiten und Prozessen gehört. Die Ergebnisse sind zu dokumentieren und zu veröffentlichen. System und Ergebnisse werden von einem Umweltgutachter geprüft.

Nach Angaben des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) waren im Juni 1.898 Standorte von 1.376 Organisationen bei EMAS registriert. Rund 5.000 Unternehmen und Organisationen hatten die Anforderungen der DIN EN ISO 14001 implementiert.

Energieverbrauch ist einer der wichtigen Aspekte, die in EMAS betrachtet werden. Das „EMAS Energy Efficiency Toolkit for Small and Medium sized Enterprises“¹¹⁷ soll insbesondere kleinen und mittleren Unternehmen helfen, ihren Energieverbrauch zu erfassen, einen Referenzwert für eine kontinuierliche Überwachung, Optimierungspotenziale zu identifizieren und typische Schwachstellen zu erkennen. Es definiert dazu einen Arbeitsplan, angefangen von der Ernennung eines Energiemanagers über die Zieldefinitionen und die Datenerfassung bis zur kontinuierlichen Überwachung des Energieverbrauchs mit geeigneten Indikatoren.

2.2.4.6 Weitere Konzepte der Qualitätssicherung im Betrieb

Die Richtlinien der AMEV - *Arbeitskreis Maschinen- und Elektrotechnik staatlicher und kommunaler Einrichtungen* definieren in Broschüre Nr. 104 „Energie 2010“¹¹⁸ Grundlagen für ein effektives Energiemanagement. Sie beschreibt dabei sowohl Prozesse als auch entsprechende Mittel.

Zentrale Grundlage eines Energiemanagements ist nach AMEV der Prozess „Energie-Controlling“. Er beinhaltet die „aktive Erfassung, Analyse und Steuerung von energierelevanten Informationen“¹¹⁹. Hier wird ein Qualitätsregelkreis aufgebaut, deren (Regel)größen, insbesondere Kennwerte für Energieverbräuche mit Bezug auf die entsprechenden Flächen (oder Betten, Essensportionen etc.), mit Hilfe von Vergleichskennwerten bewertet werden. „Bei auffälliger Diskrepanz zwischen Verbrauchs- und Vergleichswert“¹²⁰ sind entsprechende Maßnahmen zu ergreifen.

Zusätzlich werden zahlreiche prozessunterstützende Mittel genannt:

- Messtechnik und Datenverarbeitung
- Zielkennwerte (Historische und technisch-physikalisch berechnete Kennwerte sowie empirische Kennwerte eigener oder fremder Gebäude)
- Berichtskonzepte und Visualisierungen von Ergebnissen
- Vorgehensweisen im Gebäudebetrieb (z.B. Organisation, Nutzerpartizipation, Betriebsüberwachung, Checklisten).

Diese Mittel werden teilweise auch in anderen AMEV-Veröffentlichungen beschrieben. In AMEV 78 *EnMess 2001 „Geräteausstattung zur Energie- und Medienerfassung“*¹²¹ werden messtechnische Maßnahmen für das Energiemanagement dargestellt. AMEV EVA 92¹²² macht Vorgaben für die Aufgaben von Betreibern im Rahmen des Energiemanagements. AMEV *Gebäudeautomation 2005*¹²³ zeigt Möglichkeiten zur Integration der Gebäudeautomation in das Energiemanagement und einfache Plausibilitätskontrollen für die energieeffiziente Betriebsführung anhand von Beispielen.

2.2.5 Commissioning (Cx)

Commissioning¹²⁴ – kurz Cx – ist in den USA ein deutlich eigenständigerer Prozess als in Deutschland und wird zurzeit unter anderem durch entsprechende Anforderungen im Rahmen von Zertifizierungssystemen wie dem „LEED - Leadership in Energy and Environmental Design“¹²⁵ weiter verbreitet. Der prozessuale, am Lebenszyklus orientierte Charakter hat dazu geführt, dass neben dem „Initial Cx“ mittlerweile auch von Re-Cx, Retro-Cx und Continuous Cx gesprochen wird, also der Betriebsoptimierung, einer nochmaligen Inbetriebnahme (ähnlich einer Inspektion oder Instandsetzung) und der dauerhaften Überwachung bzw. einem Monitoring.

In diesem Themenfeld wurden seit Mitte der 80er Jahre weltweit eine größere Anzahl von Forschungsprojekten durchgeführt, die unter anderem auch in Verbundprojekten der International Energy Agency koordiniert wurden.

2.2.5.1 IEA ECBCS Annex 16 & 17 “Building Energy Management Systems”¹²⁶

Die beiden Arbeitsgruppen der IEA Annexe 16 und 17 untersuchten von 1987 bis 1992 vorhandene Energiemanagementsysteme für Gebäude (Annex 16)¹²⁷ und entwickelten neue Regelalgorithmen für die Gebäudeautomation auf Basis von Simulationen und Emulationen^{vi} (Annex 17)¹²⁸. Ein „Building Energy Management System“ (BEMS) wird allgemein als ein System mit den Funktionen der Kommunikation zwischen Feldebene bzw. Automationsstationen („control nodes“) und einem Leitrechner („operation terminal“) definiert, das Anlagen steuern kann, aber auch über Funktionen zur Sicherheit, Wartung oder Energiemanagement verfügt¹²⁹.

Die Arbeiten zeigen erhebliche Potenziale zur Energieeinsparung zwischen 10 und 30 %¹³⁰ durch rund ein Duzend Betriebsstrategien auf, die jedoch teilweise mit Komforteinbußen einhergingen. Amortisationszeiten werden überwiegend mit weniger als 3 Jahren angegeben¹³¹.

2.2.5.2 IEA ECBCS Annex 25 “Real Time Simulation of HVAC Systems for Buildings – Optimization, Fault Detection and Diagnostics”¹³²

In den Jahren 1991 bis 1995 ergänzt Annex 25 das Konzept der optimierten Automation um den Aspekt der Fehleridentifikation mit dem Begriff

^{vi} Als Emulation wird die Verknüpfung einer Gebäude- oder Anlagensimulation mit einer „echten“ Automationseinheit bezeichnet.

„Building optimization and fault diagnosis“ (BOFD)¹³³. Aufbauend auf den vorhandenen Regelstrategien wird hier die Erkenntnis, dass diese in der Praxis oft nicht optimal funktionieren, in den Prozess integriert. Ziel von Annex 25 war die Übertragung von Methoden der Fehleridentifikation aus industriellen Anwendungen auf Gebäude und deren Evaluation. Als Fehler^{vii} wird hier eine Abweichung des Betriebs von der geplanten Betriebsweise definiert¹³⁴, die automatisch auf Basis von Echtzeitdaten erkannt werden sollen. Die Abweichung kann eine graduelle Abweichung vom Zielwert sein und impliziert kein vollständiges Versagen der Anlage.

Wichtig ist in Annex 25¹³⁵ in diesem Zusammenhang insbesondere das Teilziel, Fehler nicht nur zu erkennen, sondern diese auch so zu bewerten (Diagnose), so dass ein optimaler Eingriff durch das Gebäudemanagement unterstützt wird. Dies erweitert die reine Datenanalyse zu einem Dienstleistungsprozess. Um die Diagnose zu unterstützen, werden verschiedene Modelle und Methoden beschrieben (White Box, Black Box, State Estimation), die einen Soll-Ist-Vergleich zwischen beabsichtigtem und tatsächlichem Betrieb ermöglichen. Die Bewertung der Abweichung soll für geeignete Parameter – einzelne Betriebsparameter oder Ergebnisse der Modellierung – und unter verschiedenen Aspekten wie Wirtschaftlichkeit, Sicherheit etc. erfolgen. Anschließend kann entschieden werden, ob der Fehler toleriert oder beseitigt wird. Mit Hilfe von Expertensystemen, Assoziativen Netzwerken und Fuzzy-Logic-Konzepten können Fehlerursachen näher bestimmt und der Prozess der Evaluation unterstützt werden.

Als kritisch für den BOFD-Prozess werden die Modellierungs-, Trainings- und Lernphasen prozesshistorischer Modelle (Black-Box) beschrieben, in denen der Soll-Zustand des Gebäudebetriebs bis zu ausreichender Genauigkeit modelliert wird, sowie der Aufwand für die Beschaffung und Aufbereitung des notwendigen Wissens über das Gebäude bzw. System.

Bemerkenswert mit Blick auf den in diesem Projekt verfolgten Ansatz ist, dass die Planung eines Gebäudes, also die Phase, in der alle Funktionen definiert werden, weder technisch noch organisatorisch in die Prozesse einbezogen wird. Diese Problematik wird erst in den folgenden Annexen 34, 40 und 47 unter dem Begriff „Commissioning“ näher betrachtet.

2.2.5.3 IEA Annex 34, 40 und 47¹³⁶

Der Abschlussbericht des IEA Annex 40 „Commissioning tools for improved energy performance“ (2001-2004) definiert Commissioning wie folgt^{viii}:

“Commissioning: Clarifying building system performance requirements set by the owner, auditing different judgments and actions by the commissioning related parties in order to realize the performance, writing necessary and sufficient documentation, and verifying that the system enables proper operation and maintenance through functional performance testing. Commissioning should be applied through the whole life of the building”¹³⁷.

In den Projekten wurden die Entwicklung von Werkzeugen zur Betriebsoptimierung und –überwachung weiter vorangetrieben und ein direkterer Praxisbezug für die konkrete Anwendung hergestellt. Als wichtige Hemmnisse für die erfolgreiche Identifikation von Betriebsfehlern werden in Annex 34¹³⁸ unter anderem die Komplexität und Individualität von Anlagen

vii Hier bezeichnet als „fault“ und „defect“

viii Deutsch: „Commissioning: Klärung der vom Bauherrn geforderten Performanceziele des Gebäudes, Erfassung und Prüfung unterschiedlicher Bewertungen und Leistungen von Fachplanern und Errichtern, um die Performance festzustellen, Erstellen notwendiger und ausreichender Dokumentation und die Prüfung durch Funktionstests, ob das Gebäude einen ordnungsgemäßen Betrieb und Betriebsführung ermöglicht. Commissioning sollte während des gesamten Lebenszyklus erfolgen“.

genannt, die Betriebsprognosen sehr aufwendig machen, und das detaillierte Planungsdaten und –ziele selten vorhanden bzw. präzise beschrieben sind¹³⁹. Datenbeschaffung und Adressierung von Datenpunkten werden als Kostentreiber des Commissioning genannt, obwohl sie reguläre Planungsleistungen sind. Umso überraschender ist, dass Fachplaner nicht als potenzielle Anwender entsprechender Werkzeuge gesehen werden. In Annex 34 werden diverse Grenzwerte („thresholds“) definiert, um Fehler, Betriebszustände oder Alarmer zu bestimmen, ohne diese als geschuldete Qualität des Gebäudes bzw. seines Betriebs aufzufassen¹⁴⁰.

In Annex 34 wurde nicht mehr nur das technische Werkzeug – die Simulation, das Modell, die Datenschnittstelle etc. – betrachtet. Vielmehr wird der Fokus auch auf den Prozess des Commissioning gerichtet, in dem Akteure und ihre Motivationen und Kompetenzen einbezogen werden. Unterschieden wird in Initial, Re-, Retro und Ongoing Commissioning, um die Prozessmodelle auf alle Phasen im Lebenszyklus von Gebäuden anwenden zu können.

Besonders hervorgehoben wird die Notwendigkeit, den Commissioning-Prozess bereits in der Vorplanungsphase einsetzen zu lassen, um die Lücke („Gap“) zwischen Planung und Betrieb zu überbrücken. Als wichtigste Aspekte sind genannt:

- Projektanforderungen des Bauherrn/Eigentümers („Owner’s Project Requirements“)
- Funktionstests („Functional Performance Testing“)
- Funktionsbeschreibungen („Systems Manual“)¹⁴¹.

Die Definition des Commissioning-Prozesses entspricht damit weitgehend den Ansätzen, wie sie grundsätzlich auch nach VOB durch Fachplaner zu erbringen sind oder im Prozess für LEED-Zertifizierungen gefordert werden. Dieser Erkenntnis folgen die weiteren Arbeitsinhalte des Annex 40 jedoch nur bedingt. Zwar werden grundsätzliche Konzepte für die Definition von Commissioning-Plänen entwickelt. Der Schwerpunkt der Arbeiten liegt dann jedoch, ähnlich wie in Annex 34, auf Werkzeugen zur manuellen oder automatisierten Betriebsanalyse. Zur Definition der Planungsabsicht werden verschiedene simulationsbasierte Modelle vorgestellt. Explizit zur Beschreibung von einzelnen Funktionen in der Planung liegen keine weiteren Arbeiten vor. Lediglich das Projekt OASE¹⁴² schlägt eine Brücke von der Planung in den Betrieb, indem in der Planung grafische Betriebsmuster zur Abbildung von Anlagenfunktionen entwickelt werden, die später im Betrieb mit entsprechenden Mustern aus Messdaten verglichen werden.

2.2.6 Fault Detection and Diagnosis (FDD)

Für das oben erwähnte Konzept der „Building optimization and fault diagnosis (BOFD)“ gibt es in der Literatur, meist unter dem Titel „Fault Detection and Diagnosis (FDD)“ mehrere, jedoch sehr ähnliche Kategorisierung für die unterschiedlichen Methoden der Modellierung.

2.2.6.1 Methoden der Modellierung

Eine umfassende Definition des Modellbegriffs hat Stachowiak in seiner Allgemeinen Modelltheorie entwickelt¹⁴³. Er beschreibt den Modellbegriff anhand von drei Hauptmerkmalen:

1. Abbildung: „Modelle sind stets Modelle von etwas, nämlich Abbildungen, Repräsentationen natürlicher oder künstlicher Originale“¹⁴⁴. Dieses Merkmal beinhaltet sowohl Abbilder von existierenden Originalen (z.B. eine Fotografie) als auch Vorbilder (wie eine Planunterlage)
2. Verkürzung¹⁴⁵: „Modelle umfassen nicht alle Attribute des durch sie repräsentierten Originals“. In Bezug z.B. auf ein Modell zur Berechnung von Eigenschaften eines Gebäudes ist das Modell immer eine reduzierte Abbildung des Original.

3. Pragmatik¹⁴⁶: „Modelle sind nicht *per se* einem Original zugeordnet“. Modelle werden absichtsvoll geschaffen von jemandem, für jemanden, innerhalb bestimmter Zeit und mit einem bestimmten Zweck.

In Bezug auf die Modellierung von Gebäuden und ihrer Funktionalität streben bestehende Konzepte in der Regel die Prognose eines als gut befundenen *Soll-Werts* für eine Zielgröße in Bezug auf einen bestimmten Zeitpunkt oder Zeitraum an, um diesen durch Vergleich mit dem entsprechenden im Original vorgefundenen bzw. gemessenen Wert zu bewerten und entsprechende Handlungen abzuleiten.

Im Bereich der FDD werden Modelle zur Nachbildung von (technischen) Prozessen sowie zur Beschreibung der Effekte von Fehlern verwendet. Isermann unterscheidet dabei theoretische und experimentelle Prozessmodelle¹⁴⁷. Theoretische Prozessmodelle nutzen die Kenntnis von Naturgesetzten oder abgeleiteten Gesetzmäßigkeiten, um ein (Rechen-)Modell eines Prozesses zu entwickeln. Dagegen nutzen experimentelle Modelle Messergebnisse aus Prozessen, indem sie Beziehungen zwischen Eingangs- und Ausgangsdaten herstellen und als mathematische Modelle beschreiben, Abbildung 8.

Theoretical modelling		Experimental modelling	
White-box models	Light-grey-box models	Dark-grey-box models	Black-box models
Linear/non-linear Differential equations	Differential equations with parameter estimation	Fuzzy-models with parameter estimation	Impulse response Neural networks
- physical laws known - parameter known	- physical laws known - parameters unknown - signals measurable	- physical rules known - model structure unknown - parameters unknown - signals measurable	- input/output signals measurable - assumption of a model structure

Abbildung 8 Verschiedene Arten mathematischer Prozessmodelle¹⁴⁸

Die Trennung der Modelle ist nicht immer eindeutig möglich oder gewollt. Deshalb existieren neben den Begriffen White-Box-Model (theoretische Modelle) und Black-Box-Model (experimentelle Modelle) auch Zwischentypen, genannt Grey-Box-Modelle, bei denen sowohl allgemeine Regeln wie auch experimentelle Parameter oder Kategorien verwendet werden.

Katipamula und Brambley¹⁴⁹ geben einen Überblick über die Terminologie und bestehende methodische Ansätze für FDD mit dem besonderen Blick auf Gebäude bzw. deren betriebstechnische Anlagen. Sie differenzieren die verschiedenen Methoden für die bereits oben genannten Prozessmodelle in quantitative, qualitative und prozesshistorische Konzepte, Abbildung 9.

DIAGNOSTIC MEHTODS		
Quantitative Model-Based	Qualitative Model-Based	Process History Based
<ul style="list-style-type: none"> - Detailed Physical Models - Simplified Physical Models 	<ul style="list-style-type: none"> - Rule-Based <ul style="list-style-type: none"> - Expert System - First-Principles Based - Limits and Alarms - Qualitative Physics-Based 	<ul style="list-style-type: none"> - Black Box <ul style="list-style-type: none"> - Statistical - Artificial Neural Networks - Other Pattern Recognition Techniques - Grey-Box

Abbildung 9 Klassifikationsschema für FDD Methoden nach Katipamula und Brambley¹⁵⁰

Quantitative Methoden entsprechen dabei den oben genannten White-Box-Modellen, die auf bekannten Funktionen des Prozesses aufbauen und entsprechende quantitative Aussagen ermöglichen. Die Modelle nutzen die gestiegene Rechenleistung moderner Computer und ermöglichen so – in Abhängigkeit von der Richtigkeit und Genauigkeit des Modells – eine aussagekräftige Abbildung von Prozessen oder auch von fehlerhaftem Betrieb. Nachteile dieser Methoden sind die aufwändige Erstellung der Modelle einschließlich ihrer Validierung, die Intransparenz der Berechnungen und die Beschaffung oder Festlegung der notwendigen Parameter und Randbedingungen.

Qualitative Modelle nutzen physikalische Gesetzmäßigkeiten, Regeln oder Grenzwerte, um die Funktion von Prozessen zu bewerten. Es liegen zahlreiche Arbeiten insbesondere zur Funktion einzelner betriebstechnischer Anlagen vor. Qualifizierende Modelle können vergleichsweise einfach erstellt werden und ermöglichen mit ihren klaren, nachvollziehbaren Entscheidungsstrukturen neben der Fehlererkennung oft auch weitere Aussagen zu ihren Ursachen. Die Modelle beziehen sich allerdings in der Regel auf spezifische Prozesse, sind also nicht einfach übertragbar auf andere betriebstechnische Anlagen. Ihre Qualität hängt fundamental ab vom Expertenwissen, auf dem die Regeln aufbauen.

Im Gegensatz zu quantitativen und qualitativen Modellen, die ohne Messdaten aus einem Prozess entwickelt werden, nutzen prozesshistorische Modelle gemessene Daten aus dem Betrieb einer Anlage und entwickeln ein Prozessmodell ohne (Black-Box) oder mit teilweisen Kenntnissen (Grey-Box) des Prozesses. Die Modelle nutzen unter anderem polynomische Korrelationen und statistische Methoden wie Regressionen, Mustererkennung, Hauptkomponentenanalysen oder Artificielle Neuronale Netzwerke. Prozesshistorische Modelle können für Prozesse genutzt werden, die nur unzureichend bekannt oder schwer mit quantitativen Modellen abzubilden sind, wie etwa der Gesamt-Energieverbrauch eines Gebäudes. Ihre Entwicklung ist vergleichsweise einfach und beruht auf bekannten mathematischen Verfahren. Voraussetzung ist der spezifische Bezug auf einzelne Systeme und das Vorhandensein von Trainingsdaten, also von Messdaten aus dem Betrieb, um das Modell zu entwickeln.

Regel-basierte Modelle hingegen nutzen Expertenwissen oder axiomatische Annahmen zur Prüfung des Betriebs. Mit diesem Konzept werden einzelne Eigenschaften eines Systems als Regeln definiert. Ein Fehler liegt vor, wenn eine Regel zum Beispiel bei Überschreiten eines Grenzwerts, nicht eingehalten ist. Mit dieser Konzeption liegen mit dem OAE – Outdoor-Economizer¹⁵¹, PAT (Performance Assessment Tool)¹⁵² und APAR¹⁵³ (Air handling units Performance Assessment Rules) erprobte Ansätze vor.

Modelle können neben der Abbildung eines optimalen Prozesses auch zur Abbildung von Fehlern genutzt werden, in dem diese in das Modell inte-

griert werden. Dadurch können die entsprechenden Auswirkungen charakterisiert und zur Fehlerdiagnose genutzt werden. Isermann differenziert die Konzepte der Fehlererkennung in Bezug auf die verwendeten Signale und die Methoden des Soll-Ist-Vergleichs wie z.B. Grenzwert- und Korrelationsanalysen, Abbildung 10.

FAULT DETECTION				
Single signals		Multiple signals		
Limit	Trend	Signal	Process	Data
<ul style="list-style-type: none"> - Fixed threshold - Adaptive threshold - Change detection methods 		<ul style="list-style-type: none"> - Correlation - Spectrum analysis - Wavelet analysis 	<ul style="list-style-type: none"> - Parameter-estimation - Neural networks - State observers - State estim. - Parity equations 	<ul style="list-style-type: none"> - Principal component analysis

Abbildung 10 Übersicht über Methoden der Fehlererkennung nach Isermann¹⁵⁴

2.2.6.2 Zustandsautomaten zur Betriebüberwachung

In einer Veröffentlichung aus dem Jahr 2007 verwenden Seem und House¹⁵⁵ ein Konzept für die regel-basierte Modellierung und Überwachung des Betriebs von Lüftungsanlagen unter Verwendung von Zustandsdiagramme bzw. -automaten. Das Problem der Beschreibung der Funktionsweise komplexer, kontinuierlich auf interne oder externe Ereignisse reagierender Systeme war Ausgangspunkt der Entwicklung von Zustandsdiagrammen („Statecharts“) durch Harel¹⁵⁶. Rumpe¹⁵⁷ beschreibt Zustandsdiagramme in ihrem ursprünglichen Kontext der Softwareentwicklungstechniken als eine Beschreibungssprache der Unified Modelling Language (UML).

Statecharts werden im Kontext der UML eingesetzt, um das Verhalten von komplexen Objekten oder Systemen zu beschreiben. Sie sind damit ebenfalls eine Form der Modellierung entsprechend der in Abschnitt 2.2.6.1 beschriebenen Definitionen. Als Aufgaben von Statecharts nennt Rumpe unter anderem die „Beschreibung des Verhaltens“ und die „Charakterisierung der möglichen oder erlaubten Verhalten eines Objekts“ sowie die „Darstellung der Reihenfolge von erlaubten Eintreten von Stimuli“¹⁵⁸.

In dem von Seem und House vorgestellten Konzept ist der Überwachungsmechanismus in die Automationsstation der Lüftungsanlage integriert. Für die Anlage werden Betriebszustände und Übergänge mit Zustandsgraphen mit einer an Harel orientierten Notation definiert. Erfasst werden einzelne Datenpunkte im Abstand von 2,5 Sekunden. Aus diesen Werten werden für einzelne Betriebszustände und Übergänge Residuen zwischen Messwerten und vordefinierten Soll-Werten berechnet und bewertet. Da einzelne Stellglieder der Anlage und entsprechend auch die betroffenen Messwerte bei Übergängen zwischen einzelnen Betriebszuständen stark modulieren, werden für betroffene Sensoren nur Messwerte in einem zeitlichen Abstand von 5 Minuten zu einem Zustandswechsel bewertet, so dass die Anlage nur in Beharrungszuständen („Steady state“) analysiert wird.

Für diese Arbeit ist die Verwendung von Betriebszuständen zur Beschreibung der Funktionen einer Anlage bemerkenswert. Die Darstellung von Seem und House wird hier zwar weder als Werkzeug der Softwareentwicklung noch als Planungswerkzeug für die Gebäudeautomation eingesetzt. Trotzdem zeigen die Darstellung und das auf dieser Basis entwickelte Konzept zur Betriebsüberwachung die Möglichkeiten von Zustandsgraphen für Funktionsbeschreibungen auf.

2.2.6.3 Prozesse als Regelkreise der Überwachung

Katipamula und Brambley stellen fest, dass zum einen die meisten Arbeiten noch im wissenschaftlichen Bereich stattfinden und zum anderen der Schwerpunkt im Bereich der Fehlererkennung liegt, während die Fehlerbewertung und Integration in den allgemeinen Optimierungsprozess nur selten Gegenstand der Untersuchungen war.

Beschreibt die Modellierung zunächst nur die Art und Weise der Generierung eines Soll-Werts und gegebenenfalls den Vergleich mit dem Ist-Wert, integriert der Prozess der Qualitätssicherung bzw. der Fault Detection and Diagnosis diese Methoden und Werkzeuge in entsprechende Abläufe und Verfahren.

Isermann stellt umfangreiche Definitionen zur Fault Detection and Diagnosis vor. Er definiert zentrale Begriffe wie Fehler, Versagen und Fehlfunktion und beschreibt Prozesse der Funktionsüberwachung.

Als **Fehler** („Fault“) in einem technischen Prozess bezeichnet Isermann eine „unzulässige Abweichung von mindestens einer charakteristischen Eigenschaft eines Systems vom akzeptablen, normalen bzw. erwarteten Zustand“¹⁵⁹. Ein Fehler ist demnach ein Betriebszustand, der eine suboptimale Performance verursachen kann. Er muss jedoch nicht zum Versagen einer Anlage oder einem Gefahrenzustand führen. Wenn also als Beispiel das Ventil in einem Heizkreis nicht vollständig schließt, liegt zwar ein Fehler vor, der – wenn die Heizungsanlage im Betrieb ist – einen suboptimalen Betrieb verursacht, in dem der Energieverbrauch ansteigt. Die Anlage erfüllt jedoch weiterhin ihren Zweck ohne das Gebäude zu gefährden oder die Menschen im Gebäude einem unbehaglichen Innenraumklima auszusetzen.

Ein **Versagen** („failure“) ist nach Isermann „eine dauerhafte Unterbrechung der Fähigkeit einer Anlagen, eine Funktion unter bestimmten Bedingungen auszuführen“¹⁶⁰. Das Versagen einer Anlagenfunktion ist ein Ereignis, das in der Regel ursächlich auf einen oder mehrere Fehler zurückgeht.

Als **Fehlfunktion** („malfunction“) wird ein vorübergehendes Versagen bezeichnet, wie z.B. ein auf Grund von Korrosion zeitweise unterbrochener elektrischer Kontakt.

Für weitere Begriffsdefinitionen von Verfügbarkeit, Sicherheit etc. wird an dieser Stelle auf die Arbeiten von Isermann verwiesen, da sie für diese Arbeit nicht von unmittelbarer Bedeutung sind.

Isermann unterscheidet vier Bereiche der FDD¹⁶¹. Ein *Automatischer Schutz* („Automatic Protection“) löst selbstständig eine Veränderung des Prozesses aus, z.B. das Umschalten in einen gesicherten Betrieb oder das Abschalten einer Anlage. *Monitoring* bezeichnet dagegen die Überwachung eines technischen Prozesses und das Auslösen von Alarmen, die direkt an einen Menschen als „Operator“ geleitet werden, um den Prozess zu bewerten und bei Bedarf zu beeinflussen. Die *Überwachung mit Fehlerdiagnose* („Supervision with fault diagnosis“) löst die Analyse des Gebäudebetriebs von der unmittelbaren Reaktion auf den Betrieb, in dem zunächst eine Analyse und Bewertung der Prozesse durchgeführt wird. Als Folge von Schutz oder Überwachung wird der Betrieb automatisch oder manuell – durch den Menschen – beeinflusst. Dies wird als *Fehlermanagement* („fault management“) bezeichnet. Die Überwachung des Anlagenbetriebs erfolgt in einem Überwachungskreis („supervisory level“).

FDD basiert allgemein auf der Messung von Variablen eines Prozesses. Unterschieden wird in der Literatur in Fehlererkennung („fault detection“) und Fehlerdiagnose. Die automatische Analyse und Bewertung zur *Fehlererkennung* erfolgt auf der Grundlage menschlichen Expertenwissens über die Funktionsweise der Prozesse und ist mithin grundsätzlich ein heuristisches Verfahren. Dabei können Analysen sich zunächst auf unmittel-

telbar prozessimmanente Variablen beziehen, die z.B. durch Grenzwerte, Signalanalysen oder mathematische Prozessmodelle überprüft werden. Darüber hinaus kann die Fehlererkennung durch menschliche Beobachtungen in einem größeren Kontext, wie z.B. durch Erfahrungen oder zusätzliche Beobachtungen ergänzt werden. Diese können wiederum beschrieben und in einen automatisierten Prozess eingebunden werden. Die *Fehlerdiagnose* untersucht auf der Basis von automatischen oder heuristischen Symptomen die Art, Größe und Ort von Fehlern, um auf Basis von Klassifizierungen oder geführten Analyseverfahren die Ursachen von Fehlern zu identifizieren. Haves hat die Kombination beschrieben als „detecting incorrect operation and diagnosing the cause of the problem“ („den Fehler erkennen und den Grund diagnostizieren“)¹⁶².

VDI 4602 Blatt 1 Energiemanagement¹⁶³ definiert im Kontext des Energiemanagements einzelne Begriffe zur Betriebs- bzw. Anlagenüberwachung entlang der Verarbeitung von Daten aus dem Gebäudebetrieb. „Monitoring“ beschäftigt sich demnach im Wesentlichen mit der Abbildung des IST-Zustands durch die Erfassung und Speicherung von Betriebsdaten, die „Simulation“ entspricht den verschiedenen oben genannten Möglichkeiten der Modellbildung. „Analyse“ bezeichnet die „systematische Untersuchung eines Prozesses/Verfahrens hinsichtlich der gewünschten Zielsetzung“. Die „Diagnose“ interpretiert die Analyse und gibt Empfehlungen für Optimierungsmaßnahmen, die durch eine „Prognose“ des zu angestrebten Zielzustands ergänzt werden kann.

Friedmann und Piette entwickeln ähnliche Schritte für den FDD-Prozess für ihren „Comparative Guide to Emerging Diagnostic Tools for Large Commercial HVAC Systems“¹⁶⁴. Am Anfang steht jeweils der *Datenimport*, also das Erfassen von Messdaten der technischen Anlagen eines Gebäudes. Dann erfolgt die *Datenverarbeitung*. Dabei findet vor einer Archivierung in der Regel eine Transformation der Daten statt. Anschließend erfolgt die eigentliche *Fehlererkennung* und *Fehlerdiagnose*. Die *Fehlerverarbeitung* umfasst dann nach der Identifikation der Fehler und ggf. ihrer Ursachen die Veranlassung entsprechender Maßnahmen, wie z.B. die Meldung an den Betreiber oder das Absetzen einer Warnmeldung.

2.2.7 Fazit

Für Produktionsprozesse außerhalb des Baugewerbes sind umfangreiche Konzepte zur Qualitätssicherung entwickelt worden. Ziel der Überwachung und Steuerung ist die Erreichung von Prozessen, die fähig sind, die Qualitätsanforderungen zu erfüllen und *beherrscht* sind, also sich nur innerhalb definierter Grenzen oder auf bekannte Art und Weise verhalten. Linß bezeichnet diese Statistische Prozessregelung (SPC - Statistical Process Control) auch als Regelkreis analog zu „echten“ Regelungstechnik, die in sogenannten Qualitätsregelkarten^{ix} nachgehalten werden¹⁶⁵.

Im Vergleich dazu ist die funktionale Qualitätssicherung in Gebäuden unterentwickelt. Die Vielzahl von Normen und Richtlinien sowie die umfangreiche Forschung zur Betriebsüberwachung und -optimierung belegen zwar sowohl das große Potential zur Verbesserung der Energieeffizienz in Gebäuden als auch die technischen Möglichkeiten zur Identifikation der entsprechenden Defizite in Gebäuden. Es fallen jedoch einige Punkte ins Auge, die Ursache dafür sein könnten, dass eine verbreitete Anwendung in der Praxis noch nicht erfolgt.

Als Werkzeuge für die Betriebsüberwachung von Gebäuden liegen nur wenige kommerzielle Anwendungen vor. Gründe sind nach Katipamula und Brembley¹⁶⁶ unter Anderem ein fehlender Bedarf bei Gebäudebetreibern sowie technische Defizite wie Sensorqualität und nicht ausreichende

^{ix} Der Begriff „Qualitätsregelkarte“ bezieht sich ursprünglich auf den Ausdruck der entsprechenden Daten.

Möglichkeiten des Datenmanagements in der Praxis. Die vorhandenen Werkzeuge stellen zudem hohe Anforderungen an die Anwender.

Der Autor vermutet eine wichtige Ursache in den verschiedenen Sichtweisen der Entwickler dieser Werkzeuge. Die vorgestellten Konzepte und Methoden erscheinen entweder stark aus Sicht des Managements definiert zu sein. Sie beschreiben dann präzise Prozesse zum Energiemanagement mit Aufgaben, Verantwortlichkeiten und Arbeitsabläufen, definieren aber selten konkretes ingenieurtechnisches Vorgehen für Anlagen oder Funktionen. Oder sie sind ingenieurgetrieben und nicht in einen konkreten und qualitätsgesicherten Projektablauf integriert, in dem die Motivation für die Anwendung, oder um mit Stachowiak zu sprechen, die pragmatische Frage nach dem Zweck der Modellierung definiert wird.

Auffallend sind die bei den verschiedenen methodischen Ansätzen zur Betriebsoptimierung weiterhin vorhandene Trennung von Planung und Betrieb und die damit fehlende Durchgängigkeit im Lebenszyklus. Dieses Defizit liegt aber auch in der Planung der Gebäude vor: die vorhandenen Methoden zur Planung und Errichtung von Automationsanlagen zeigen keine inhaltliche und formale Definition für die Darstellung der intendierten bzw. geschuldeten Funktionalität der Gebäude und Anlagen. Auch diese Darstellungen wären ein Modell für den Gebäudebetrieb. Im Gegensatz zu den oben genannten Methoden der Fehleranalyse, die im Betrieb zusätzlich entwickelt werden müssen, werden diese Darstellungen bereits heute, wenn auch in nur bedingt geeigneter Form, als Planunterlagen frühzeitig im Prozess entwickelt, um intendierte Funktionen zu beschreiben.

2.3 Darstellungskonzepte für Funktionsbeschreibungen

Als technische Spezifikation von Automationsanlagen werden nach DIN EN ISO 16484 und VDI 3814 neben der Beschreibung der gebäudetechnischen Anlagen unter anderem eine allgemeine Funktionsbeschreibung und Spezifikationsunterlagen für jedes System gefordert. Dabei werden keine genauen Vorgaben, jedoch beispielhafte Darstellungen zu Umfang und Gestaltung der Funktionsbeschreibungen gemacht, die im Folgenden vorgestellt werden.

2.3.1 Anlagenschemen, Funktionslisten, Texte

DIN EN ISO 16484 nennt verschiedene Möglichkeiten zur Darstellung von Automationsfunktionen: „Anlagenspezifische Funktionen können in Automationsschemata, in Steuerungsablaufdiagramme und der GA-Funktionsliste (GA-FL) dokumentiert werden“¹⁶⁷. Für einzelne Teile werden Darstellungsformate vorgeschlagen, wie z.B. ein Anlagenschema im Format A4 quer, das aus VDI 3814¹⁶⁸ übernommen wurde.

Die Anlagendarstellung im Anlagenschema ist ein vereinfachter Plan der entsprechenden technischen Anlage. Sie wird ergänzt durch die einzelnen vorgesehenen Bauteile der Mess-, Steuer- und Regelungstechnik an ihren jeweiligen Einbauorten, Abbildung 11.

Unterhalb der Darstellung des Anlagenaufbaus sind die Regelstrukturen für die Anlage dargestellt. Verwendet werden Funktionsblöcke nach IEC 60617-DB¹⁶⁹ bzw. DIN 19227¹⁷⁰. Diese sind jeweils mit den entsprechenden Sensoren und Aktoren in der Anlagendarstellung verbunden.

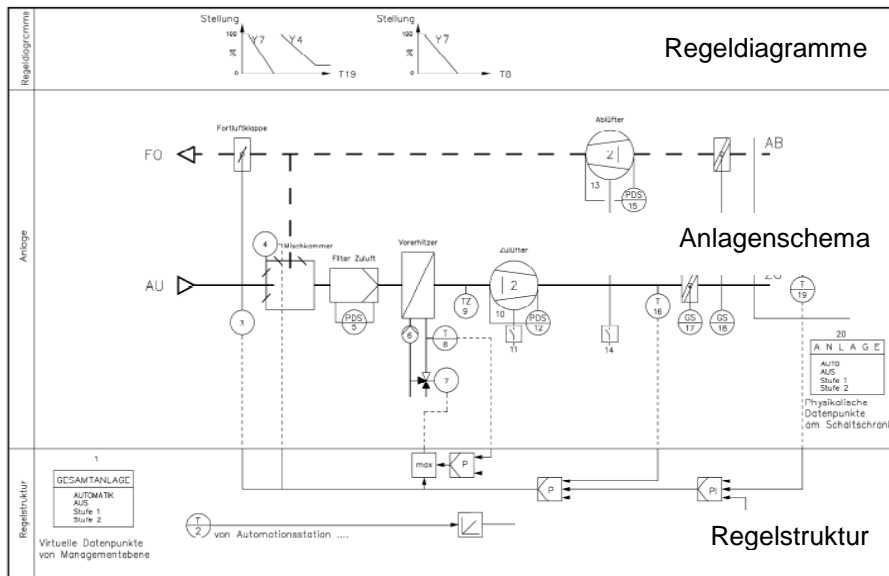


Abbildung 11 Beispiel der Anlagendarstellung einer Lüftungsanlage¹⁷¹

Oberhalb des Anlagenaufbaus sind Regeldiagramme einzutragen. Diese zeigen grafische Darstellungen von Funktionen bzw. sogenannten Sequenzen in Form von Kennlinien. Sequenzen werden genutzt, um unterschiedliche Stellglieder in Abhängigkeit von der entsprechenden Stellgröße anzusteuern.¹⁷² Auf der Abszisse können der gesamte Stellbereich einer Anlage, die Regeldifferenz x_w oder eine Führungsgröße (z.B. die Außenlufttemperatur) aufgetragen werden, auf der Ordinate die entsprechende Stellgröße y_i , siehe Abbildung 12.

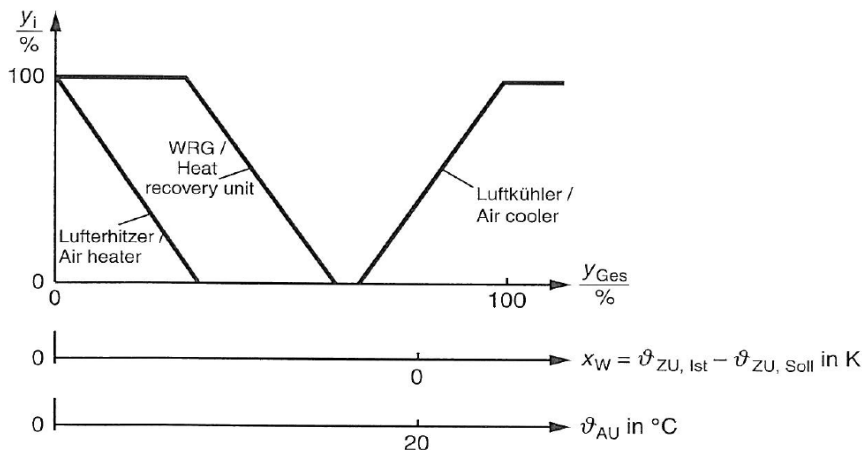


Abbildung 12 Sequenzbild für die Luftbehandlungsstufen einer Lüftungsanlage¹⁷³

Funktionslisten dienen der Kalkulation von GA-Projekten sowie der herstellerunabhängigen Ausschreibung von Automationsfunktionen. Sie ermöglichen das tabellarische Dokumentieren und Aufsummieren einzelner Funktionen als Massenermittlung einschließlich entsprechender Parameter, Steuerungslogik und textlichen Hinweisen.

Neben den genannten grafischen Darstellungen enthält Anhang B der DIN EN ISO 16484 auch ein Beispiel für eine textliche Funktionsbeschreibung einer Heiz-/Kühlanlage. Auffallend mit Blick auf diese Arbeit ist, dass sowohl die Steuerungsablaufpläne wie auch die textlichen Beschreibungen als Strukturelemente Betriebszustände verwenden, im Steuerungsablaufdiagramm als Endpunkte des Entscheidungsweges, im Text als hervorgehobene Überschriften, z.B. „bei Sommerbetrieb ...“¹⁷⁴.

2.3.2 Zustandsautomaten

An verschiedenen Stellen wird im Normenwerk die Herausforderung der zunehmenden Komplexität von Gebäuden angesprochen und teilweise sogar ausdrücklich als Problem im Zusammenhang mit der Darstellung von Funktionen adressiert.

So sind die Darstellungen nach VDI 3814 nach Anlagen zu strukturieren. Für jede Anlage ist ein Anlagenschema zu erstellen. Die Darstellung anlagenübergreifender Funktionen wird ebenfalls gefordert¹⁷⁵, jedoch wird hierzu kein expliziter Vorschlag für die formale Darstellung gemacht. VDI 3525 macht die Vorgaben für die Regelung und Steuerung von Raumlufttechnischen Anlagen. In der beispielhaften Darstellung einer Anlage in Teil 3.1 werden einzelne Verarbeitungsfunktionen jedoch nicht als Übertragungsglieder eingetragen, um „den Bereich Regelstruktur des Automationschemas nicht zu überfrachten“¹⁷⁶. Als grafische Darstellungsmöglichkeit werden in DIN EN ISO 16484 Steuerungsablaufpläne angeführt¹⁷⁷.

Zur verbesserten grafischen Darstellung von Steuerungsaufgaben und komplexen Funktionen stellt VDI 3814 Teil 6 fest, dass nach den Kriterien der VDI 3681 zur „Einordnung und Bewertung von Beschreibungsmitteln aus der Automatisierungstechnik“¹⁷⁸ die „bisher häufig verwendete textliche Beschreibung“ schon bei einfachen Aufgabenstellungen schnell an ihre Grenzen¹⁷⁹ stößt. Sie empfiehlt stattdessen die Verwendung graphischer Darstellungsmittel, insbesondere von Zustandsgraphen.

VDI 3814 Teil 6 überträgt das Konzept der Zustandsgraphen aus dem oben genannten Kontext der Softwareentwicklung auf gebäudetechnische Anlagen, um die Beschreibung ihrer Funktionen zu unterstützen. Zustandsgraphen beschreiben hier die Funktionen eines Systems mit einzelnen Zuständen, in denen sich dieses System befinden kann. In dem in VDI 3814 verwendeten Konzept kann eine Anlage zu einem Zeitpunkt genau einen Zustand einnehmen. Der Übergang von einem zum anderen Zustand ist an Bedingungen geknüpft, Abbildung 13.

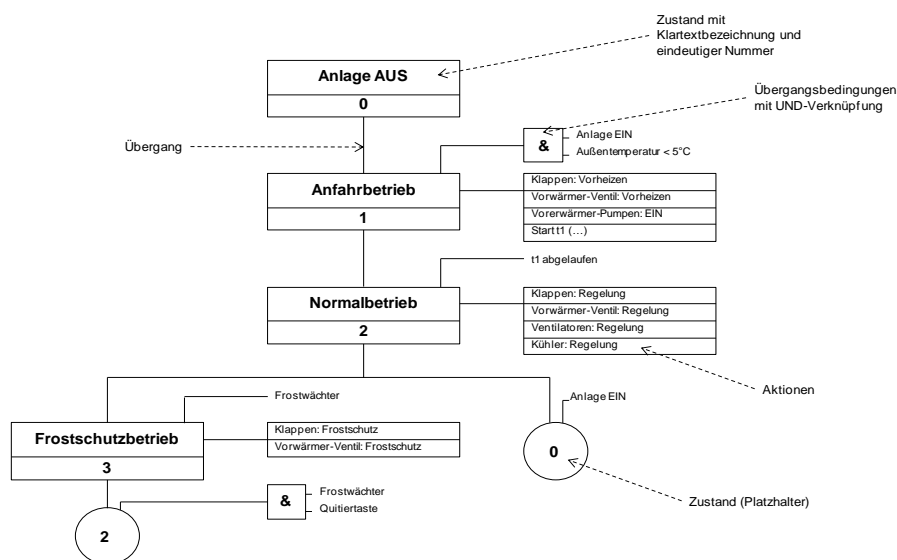


Abbildung 13 Zustandsgraph für eine Lüftungsanlage nach VDI 3814 Teil 6¹⁸⁰

Die dargestellte Anlage kann vier Zustände einnehmen: Aus, Anfahrbetrieb, Normalbetrieb und Frostschutzbetrieb. Die Zustände sind miteinander verbunden, um zu zeigen, wie die Anlage von einem Zustand in einen anderen wechseln kann. Übergänge z.B. von 1 nach 3 sind nicht möglich. Rechts neben dem Symbol für den Zustand sind die einzelnen Aktionen bzw. Eigenschaften der Anlage dargestellt, die in diesem Zustand vorgeesehen sind.

Der Zustandsgraph nimmt in der Norm bereits eine A4-Seite ein und verzichtet „wegen der besseren Übersichtlichkeit auf die Darstellung der Aktionen“¹⁸¹. Sie werden separat in einer Zuordnungstabelle dargestellt, in der auch Kurzbezeichnungen für die Aktionen und teilweise eine Parametrierung enthalten ist.

Die Firma Siemens nutzt in ihrer Software S7-HiGraph¹⁸² Zustandsgraphen zur Entwicklung von Speicherprogrammierbaren Steuerungen für technische Anlagen.

Als Vorteile für die Beschreibung von Systemen mit wenigen Vorgängen und einer geringen Anzahl eindeutig definierter Betriebszustände werden die Orientierung an technischen Objekten und die leichte Erfassbarkeit genannt.

Ein Produkt zur Erstellung von Funktionsbeschreibungen und zur Überwachung ihrer Umsetzung im Gebäudebetrieb unter Verwendung von Zustandsgraphen ist dem Autor nicht bekannt.

2.3.3 Adressierung

DIN EN ISO 16484 fordert für Gebäude die Definition eines Adressierungssystems, mit dem jeder physikalische und virtuelle Datenpunkt eindeutig adressiert werden kann. Die Adressierung wird für den „Zugriff auf und die Anzeige von Informationen genutzt“¹⁸³. Die Adresse kann typische Informationen wie Ort, Gebäude oder das technische Gewerk umfassen, muss jedoch nicht als Klartext verständlich lesbar sein.

VDI 3814-1 fordert, dass die Adressierung von Datenpunkten zwischen „so kurz wie nötig“ und „so lang wie erforderlich“ liegen sollte¹⁸⁴. Eine entsprechende Gerätekenzeichnung für die Adressierungsstruktur ist in VDI 3814-1 Anhang B¹⁸⁵ dargestellt. Der dort vorgegebene Kennzeichnungsschlüssel hat jedoch schon 32 Stellen¹⁸⁶.

2.3.4 Dokumentenformate

Zur Erstellung von Anlagenschemen und GA-Funktionslisten sind am Markt zurzeit zahlreiche Softwareprodukte verfügbar, die sich an den Vorgaben der DIN EN ISO 16484 orientieren. Dies sind teils proprietäre Programme von Herstellern von Gebäudeautomationssystemen, aber auch produktunabhängige Software-Systeme. Sie dienen in erster Linie der Massenermittlung sowie der Erstellung von Leistungsverzeichnissen und nicht der Beschreibung von Funktionen.

Implizit wird in den vorgestellten Normen und Richtlinien davon ausgegangen, dass Funktionsbeschreibungen der Form nach als Textdokumente erstellt werden und nicht als Planunterlagen in Großformaten, wie für die Anlagendarstellung üblich. Inhaltlich wird für alle grafischen Beschreibungen auf die Verwendung entsprechender Normen für die Darstellung von Bauteilen der Technischen Gebäudeausrüstung hingewiesen, insbesondere der ISO 3511¹⁸⁷ bzw. DIN 19227¹⁸⁸.

Die Erstellung von Funktionsbeschreibungen kann entsprechend mit üblichen Textverarbeitungs- und Grafikprogrammen erfolgen, die einen hohen Freiheitsgrad in der Darstellung haben und nicht erwarten lassen, dass Planer präzisen Leitlinien folgen.

2.3.5 Fazit

Als wesentliche Beschreibungsmerkmale von GA-Systemen wurden im Normenwerk identifiziert:

- Anlagenaufbau
- Steuer- und Regelfunktion
- Parametrisierung^x (z.B. Führungs- und Regelgrößen)
- Adressierung

Als präzise Vorgabe für die Erstellung einer Funktionsbeschreibung als Grundlage der Umsetzung durch den Errichter der Anlage fehlen aus Sicht des Autors folgende Vorgaben:

- Format des Dokuments
Da die Funktionsbeschreibung eine Grundlage für ein komplexes, noch zu entwickelndes System darstellt und im Verlauf eines Projekts verändert und weiterentwickelt wird, sollte zumindest die Intention einer Umsetzung in Form von Werkzeugen jenseits der Textverarbeitung dargestellt werden.
- Parametrierung
Nach der Parametrisierung kann in Projekten entweder als vorläufige Annahme oder als feste Vorgabe eine Parametrierung erfolgen, indem z.B. Zeitprogramme definiert und Sollwerte für Temperaturen definiert werden. Diese können, z.B. bei der Beschreibung von komplexen hydraulischen Systemen mit unterschiedlichen Betriebszuständen das Verständnis der Beschreibung verbessern.
- Prozess der Verwendung der Funktionsbeschreibung im Projekt
Die oben erwähnte und in der Literatur stark beklagte Lücke zwischen Planung und Betrieb liegt auch bei Funktionsbeschreibungen vor. Wie dargestellt, ist in DIN EN 16484 kein durchgängiger Prozess zur Anwendung in Projekten erkennbar.

Für die Beschreibung dieser Merkmale von Funktionen werden keine oder unpräzise Vorgaben gemacht. Für Funktionsbeschreibungen liegt damit in der Praxis kein vollständiges und verbindliches Darstellungskonzept vor. Insgesamt fehlen Methoden und Werkzeuge (Software) für die Beschreibung und Prüfung von Funktionen.

Angesichts der großen Bedeutung der Funktionen technischer Anlagen in Gebäuden für die Energieeffizienz, den Nutzerkomfort und die Wirtschaftlichkeit, überraschen die unpräzisen Vorgaben des Normenwerks und das Fehlen von Werkzeugen zur Erstellung von Funktionsbeschreibungen. Eine Ergänzung der Spezifikationsmöglichkeiten erscheint dringend geboten.

Gebäude und Anlagen erreichen im Betrieb in Bezug auf Energieeffizienz und Nutzerkomfort oft nicht die intendierten Ziele: sie funktionieren nicht optimal. Die in diesem Abschnitt erarbeitete Übersicht zum Stand des Wissens und der Technik zeigt, dass die Vorgaben und Werkzeuge, mit denen Funktionsbeschreibungen erstellt werden, der gestiegenen Bedeutung für die Energieeffizienz und der technischen Komplexität der Anlagen weder formal noch inhaltlich gerecht werden.

^x Eine eindeutige Differenzierung der Begriffe *Parametrisierung* und *Parametrierung* liegt dem Autor nicht vor. Im Rahmen dieser Arbeit wird unter *Parametrisierung* die Zuweisung von Parametern zu einem System, unter *Parametrierung* die Zuweisung von Werten zu Parametern verstanden.

3 ANALYSE VON FUNKTIONSBESCHREIBUNGEN IN DER PRAXIS

Jörg Balow beklagt in seinem Standardwerk „Systeme der Gebäudeautomation“, Spezifikationen für GA-Systeme seien in „Art und Aufbau sehr unterschiedlich gestaltete und getextete, mehr oder weniger professionelle Leistungsbeschreibungen“¹⁸⁹. Er macht ausdrücklich keine Vorgabe für eine einheitliche Darstellung, erwähnt jedoch als wesentliche Komponenten der Dokumentation „die Steuer- und Regel-Beschreibung, in Prosa und/oder Zustandsgraph“¹⁹⁰.

Um dieses auch im vorangegangenen Abschnitt erkannte Defizit eines umfassenden Darstellungskonzepts für Funktionsbeschreibungen in der Praxis zu verifizieren und um die Entwicklung einer neuen Darstellungsweise für Funktionsbeschreibungen praxisnah zu gestalten, werden neben den oben genannten normativen Vorgaben im Folgenden Beispiele aus der Praxis analysiert.

Die Auswahl von sechs Funktionsbeschreibungen stammt aus den Forschungsprojekten des IGS - Instituts für Gebäude- und Solartechnik der TU Braunschweig zu innovativen und energieeffizienten Bürogebäuden. Sie ist nicht repräsentativ, gibt aber Hinweise darauf, wie Funktionsbeschreibungen in der Praxis erstellt werden und wo Defizite und Optimierungspotenziale bestehen. Die Gebäude sind in Betrieb; Die Unterlagen sind alle auf dem Stand der Revisionsplanung. Eine Bewertung der inhaltlichen Richtigkeit oder Sinnhaftigkeit der Beschreibungen erfolgt nicht.

3.1.1 Funktionsbeschreibung Neues Regionshaus Hannover¹⁹¹

Die Funktionsbeschreibung des Bürogebäudes Neues Regionshaus Hannover liegt als Dokument im Papierformat A4 und doc-Dateiformat (Microsoft Office Word) vor. Es ist mit schwarz-weiß Texten und farbigen Grafiken dargestellt. Die Unterlage umfasst 62 Seiten.

Die Funktionsbeschreibung ist entsprechend einzelner Anlagen in 13 Abschnitte gegliedert, die jedoch sehr unterschiedlichen Umfang und Tiefe aufweisen. Die Beschreibung der größten Lüftungsanlage umfasst 17 Seiten und verwendet zahlreiche Grafiken und Tabellen zur Darstellung. Zum Vergleich: Die Beschreibung der Funktionen aller Beleuchtungssteuerungen im Gebäude umfasst eine halbe Seite Text.

In den Abschnitten zu den Anlagen für Heizung, Kühlung und Lüftung sind jeweils ein oder zwei Anlagenschemen entsprechend VDI 3814 vorangestellt. Diese umfassen eine Grafik zum Aufbau der Anlage sowie einzelne Regeldiagramme, siehe Abbildung 14. Regelstrukturen sind nicht grafisch, sondern im Text beschrieben.

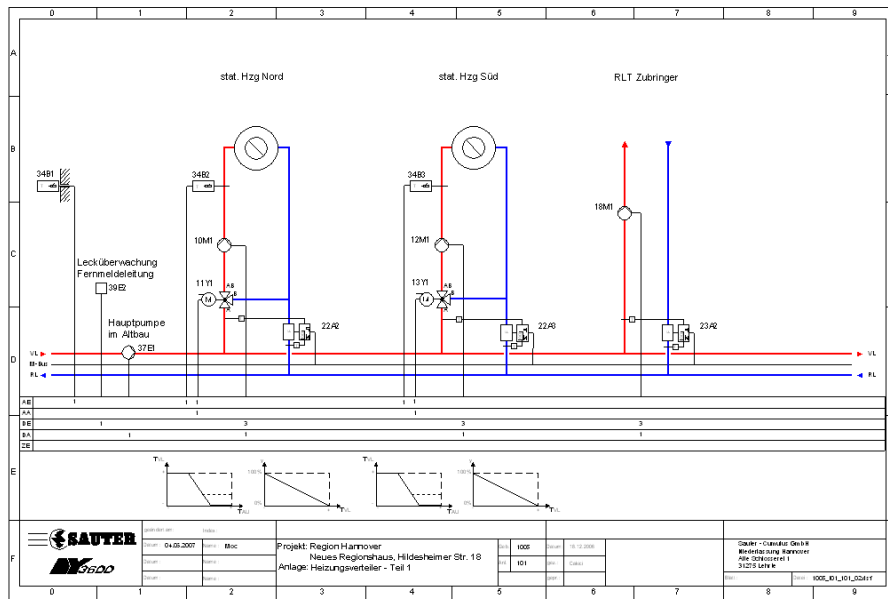


Abbildung 14 Darstellung des Anlagenschemas für drei Heizkreise¹⁹²

Im mittleren Segment unter den Hydraulikschemen sind die für die Umsetzung vorgesehenen analogen und digitalen Datenpunkte zur Parametrisierung dargestellt. Die Darstellung enthält darunter einzelne Kennlinien, ohne diesen konkreten Funktionen zuzuordnen und ohne Parametrierung an dieser Stelle.

Zur Beschreibung der Regelung in einzelnen Betriebszuständen werden anschließend die verschiedenen Funktionen in einzelnen Unterabschnitten textlich beschrieben. Hierzu werden für die Heizungs- und Lüftungsanlagen Kennlinien verwendet, bei denen über die Skalierung der Achsen teilweise eine (aus den Graphen abzulesende) Parametrierung erfolgt, Abbildung 15.

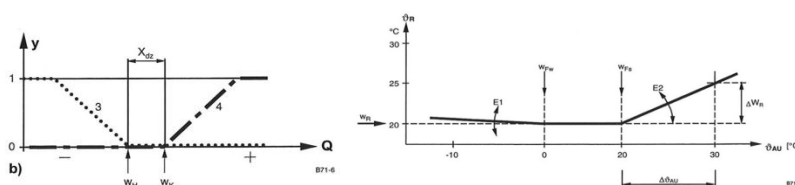


Abbildung 15 Darstellung von Kennlinien im Normalbetrieb einer Lüftungsanlage: Sequenz von Heiz- und Kühlregister einer Lüftungsanlage (links) und Winter-/Sommerkompensation für die Zulufttemperatur¹⁹³

Die Angaben für den Wechsel von einem Betriebszustand in einen anderen erfolgen als textliche Beschreibung mit eingebundenen logischen und mathematischen Operanden, Abbildung 16.

Einschaltbedingungen:

- Die Raumtemperatur liegt über dem eingestellten Maximalgrenzwert $t_{\text{Raum, Ist}} > t_{\text{Raum, max, INK}}$ von 26 °C.
- Die Außenlufttemperatur liegt über dem eingestellten Minimalgrenzwert $t_{\text{AU, Ist}} > t_{\text{AU, min, INK}}$ von 24 °C.
- Die Differenz zwischen Raum- und Außenlufttemperatur ist größer als die eingestellte Temperaturdifferenz $\Delta t[t_{\text{Raum, Ist}} - t_{\text{AU, Ist}}] > \Delta t_{\text{sol}}[t_{\text{Raum, Ist}} - t_{\text{AU, Ist}}]$
- Der Zeitpunkt ist nach Vorgaben des Nutzers im Versuch zu ermitteln.

Abbildung 16 Darstellung von Bedingungen für den Wechsel des Betriebszustands¹⁹⁴

Die Parametrisierung erfolgt sowohl innerhalb der beschreibenden Texte, in dem einstellbare Werte in der Farbe Blau hervorgehoben sind (Abbildung 17), als auch in jeweils am Ende einiger Abschnitte aufgeführten Tabellen für einzustellende Werte, Abbildung 18 und Abbildung 19.

Steigt dabei die Rücklauftemperatur über die Dauer einer vorgegebenen Zeit $T_{\text{Frost,Wasser}} = 300\text{s}$ nicht über den Grenzwert von $t_{\text{Erh,RL}} \geq +30^\circ\text{C}$ an, schaltet die Anlage auf den Betriebszustand „Frostgefahr“. Die Anlage wird abgeschaltet und gegen Wiederanlauf im Schaltschrank verriegelt.

Abbildung 17 Parametrisierung durch Hervorhebung im Text¹⁹⁵

Beschreibung	Eingestellte Werte	Änderung	Änderung
Min. Zulufttemperatur	18,0 °C		
Max. Zulufttemperatur	40,0 °C		
Raumtemperatur (alle Zonen)	20,0 °C		

Abbildung 18 Parametrisierung von Sollwerten in Tabellen¹⁹⁶

In den Parametrisierungstabellen für Sollwerte fällt auf, dass zwei zusätzliche Spalten für Änderungen vorgesehen sind. Hier wird offensichtlich davon ausgegangen, dass nach der initialen Parametrisierung eine Einregulierung oder Optimierung im Betrieb mit veränderten Parametern erfolgt. Ein Verwendungsprozess ist also zumindest angedacht.

Die Tabellen für die Zeitprogramme sind ohne Inhalte dargestellt. Es erfolgt keine Vorgabe für die Einstellung der Zeitprogramme, Abbildung 19.

Zeitschaltprogramm FAK (freie Aussenluftkühlung) (EY3600 - Unterstation):

	Mo.	Die.	Mi.	Do.	Fr.	Sa.	So.
Einsch:	--:--	--:--	--:--	--:--	--:--	--:--	--:--
Aussch:	--:--	--:--	--:--	--:--	--:--	--:--	--:--
Einsch:	--:--	--:--	--:--	--:--	--:--	--:--	--:--
Aussch:	--:--	--:--	--:--	--:--	--:--	--:--	--:--

Abbildung 19 Parametrisierung von Zeitprogrammen in Tabellen¹⁹⁷

Bei keiner der Parametrisierungen werden Datenpunktadressen verwendet, die eine eindeutige Zuordnung zu den Funktionen in der Gebäudeautomation ermöglichen.

3.1.2 Funktionsbeschreibung EnergieForum Berlin¹⁹⁸

Die Funktionsbeschreibung umfasst 65 einzelne Dokumente mit jeweils 3 bis 6 Seiten. Alle Dokumente liegen im Format A4 als doc-Dateien (Microsoft Office Word) vor und sind vollständig in schwarz-weiß dargestellt. Die Beschreibungen enthalten überwiegend textliche Beschreibungen, die durch Tabellen und einzelne Grafiken ergänzt werden. Alle Seiten des Dokuments tragen das Logo des Herstellers des Gebäudeautomations-systems (Honeywell).

Die einzelnen Dokumente beziehen sich jeweils auf eine Anlage, teilweise auch auf interne Funktionen (Berechnung einer über 72 Stunden gemittelten Außenlufttemperatur). Übersichten zu Soll- und Einstellwerten sind in separaten Dokumenten dargestellt. Die Parametrisierung erfolgt jedoch nicht in grafischen Schemen, so dass eine präzise technische Zuordnung nur bedingt möglich ist.

Die einzelnen Beschreibungen sind einheitlich strukturiert und gestaltet. Charakteristisch ist die Darstellung verschiedener Betriebszustände von Anlagen, bei denen textliche Beschreibungen mit logischen Operationen und an Programmiersprachen angelehnten Argumenten zur Darstellung von Bedingungen für den Wechsel von Betriebszuständen kombiniert werden, Abbildung 20.

Winterfall

Es wird der einstellbare Grenzwert mit der über 72h gemittelten Aussentemperatur (T_{amb72h}) und die aktuelle Aussentemperatur (M1H03_Aussentemp) mit einem einstellbaren Grenzwert verglichen.

Das Kriterium ist erfüllt, wenn $T_{amb72h} < M1H03_GW_Win$ |
UND $T_{aktuell} < M1H03_GW_aktuellAT$ ist.

Datenpunkt	Klartext	Wert/Einheit
M1H03_GW_Win	Grenzwert Winterfall	°C
M1H03_GW_aktuellAT	Grenzwert aktuelle AT	°C

Sommerfall

Das Kriterium Winterfall bleibt solange bestehen, bis der Wert von T_{amb72h} den eingestellten Sommergrenzwert überschreitet oder die aktuelle Aussentemperatur größer als der eingestellte Grenzwert ist.

Das Kriterium ist erfüllt, wenn $T_{amb72h} > M1H03_GW_Som$
ODER $T_{aktuell} > M1H03_GW_aktuellAT$ ist.

Datenpunkt	Klartext	Wert/Einheit
M1H03_GW_Som	Grenzwert Sommerfall	°C

Abbildung 20 Darstellung von Betriebszuständen mit Datenpunktadressen (EFB, M1H03)¹⁹⁹

In den Argumenten werden die Datenpunktadressen der Gebäudeautomation und Kurzbezeichnungen verwendet. Die Datenpunktadressen werden anschließend in Tabellen mit Klartexten und physikalischen Einheiten dargestellt.

Neben den logischen Operationen werden auch Kennlinien bzw. Regeldiagramme entsprechend VDI 3814 verwendet. Sie werden jedoch nicht im Kontext eines vollständigen Anlagenschemas verwendet. Die Regelstruktur wird im Text erläutert, der Aufgabendau nicht dargestellt. Die Kennlinien werden in der Beschreibung weitgehend sowohl mit einer Vorgabe wie mit minimal und maximal zulässigen Werten parametrisiert und adressiert, Abbildung 21.

Der Text enthält Verweise auf die Abbildungen „4“ und „5“, die auch unter den entsprechenden Grafiken zu finden sind. Es sind jedoch die beiden einzigen Verweise im Text; die Abbildungen „1-3“ sind in der Beschreibung nicht enthalten. Möglicherweise handelt es sich bei den Abbildungen um einen Textblock, der aus einer allgemeinen Funktionsbeschreibung kopiert wurde.

Neben einfachen Kennlinien werden auch Sequenzen mehrerer Stellglieder dargestellt, die über einer nicht parametrisierten Regeldifferenz aufgetragen werden, siehe Abbildung 22. Bemerkenswert in dieser Darstellung ist, dass für die Regelgröße, in diesem Fall die Zulufttemperatur einer Lüftungsanlage, die zur Berechnung der Regeldifferenz notwendigen Datenpunktadressen für den Sollwert und den Istwert genannt werden.

Die maximale und minimale Systemvorlauftemperatur sind durch die Parameter P_2 und P_3 festgelegt. Die Sollwerterhöhung pro Minute ist durch die Einstellung von Parameter P_4 begrenzt, wie in Abb. 4 dargestellt.

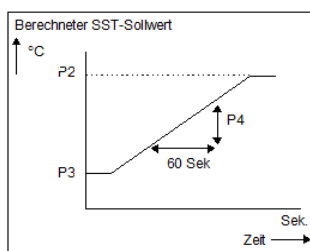


Abb. 4 Begrenzung der Sollwerterhöhung

Das SST-Regelsignal (Ausgang auf die Sequenz der beiden Ventile) bewegt sich, abhängig vom berechneten P-Band (Anzeige durch Parameter P_{32}), der Nachstellzeit (P_8), der D-Zeit (P_9) und dem berechneten Sollwert für die Systemvorlauftemperatur zwischen 0 und 100%, wie in Abb. 5 dargestellt.

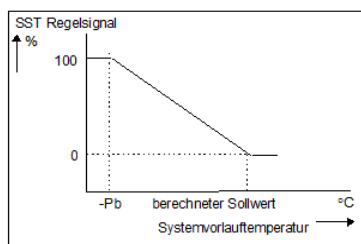


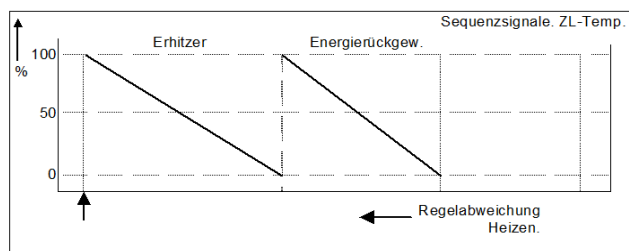
Abb. 5 PID-Regelsignal

Parameter				
Nr	Kurzbeschreibung	Bereich	Vorgabe	Einheit
2	Max. Systemvorlauftemperatur	50...200	85	°C
3	Min. Systemvorlauftemperatur	0...90	10	°C
4	Max. Sollwerterhöhung pro Minute	0...100	5	K
8	I-Zeit für Systemvorlauftemperaturregelung	0...3600	300	Sek.
9	D-Zeit für Systemvorlauftemperaturregelung	0...1000	0	Sek.
10	Sollwerterhöhung für Systemvorlauftemperatur	0...20	2	K
32	Berechnetes P-Band für SST-Regelung	-	-	K

Abbildung 21 Darstellung von Kennlinien mit Datenpunktadressen (EFB, M1H03)²⁰⁰

Temperaturregelung

Es eine Konstante Zulufttemperaturregelung realisiert. Hierbei wird der Zulufttemperatur Istwert mit dem eingestellten Zulufttemperatur Sollwert verglichen. Eine Abweichung hat die Ansteuerung der Aggregate Wärmerückgewinnung / Vorerhitzer in Sequenz zur Folge. Hierfür wird das Ausgangssignal des Reglers auf die beiden Aggregate aufgeteilt. Im Sommerbetrieb ($AT > 20^\circ\text{C}$ / Erhitzer gesperrt) wird das Regelsignal der WRG umgekehrt. Ist in diesem Kühlfall die Ablufttemperatur vor der WRG geringer (Hysterese 2K) als die Aussenlufttemperatur, so wird die WRG angesteuert und zum Kühlen der Zuluft verwendet.



Datenpunkt	Klartext
NAL02_M03VEZU_SW1	Zulufttemperatur Sollwert
NAL02_B08F_ZUT_MW0	Zulufttemperatur Istwert

Abbildung 22 Darstellung einer Sequenz von zwei Stellgliedern²⁰¹

3.1.3 Funktionsbeschreibung Bürogebäude VGH Versicherung²⁰²

Die Funktionsbeschreibung des Bürogebäudes der VGH Lüneburg liegt als Dokument im Papierformat A4 und Dateiformat pdf vor und ist vollständig in schwarz-weiß dargestellt. Die Unterlage umfasst 55 Seiten. Sie enthält überwiegend textliche Beschreibungen, einige Tabellen und einige Grafiken bzw. Darstellungen von Kennlinien. Alle Seiten des Dokuments tragen das Logo des Herstellers des Gebäudeautomationssystems (Jonson Controls).

Die Funktionsbeschreibung ist nach insgesamt 49 einzelnen Anlagen gegliedert, wobei einzelne hydraulische Kreise jeweils als separate Anlage dargestellt werden. Die Anlagenbeschreibungen sind wiederum in die Abschnitte wie „Allgemein“, „Steuerung“, „Störungen“, „Feuerwehrschtaltung“ und „Regelung“ eingeteilt.

Im Abschnitt Allgemein werden jeweils der Aufstellungsort der Anlagen sowie die Bezeichnung des entsprechenden Informationsschwerpunkts genannt.

Der Abschnitt Steuerung enthält die textliche Beschreibung der Einschaltbedingungen für einzelne Betriebszustände wie „Handbetrieb“, „Automatikbetrieb“ und „Pumpenblockierschutz“. Im Text werden vergleichende Operanden („<“, „>“) verwendet und Parameter für entsprechende Grenzwerte genannt.

Zur Beschreibung von Regelungen werden in Texten an der VDI 3814 und VDI 3525 orientierte Begriffe wie „Zuluftkonstantregelung“ (Anlage 2L0100, Seite 7) oder „witterungsgeführte Vorlauftemperaturregelung“ (Anlage 2H0300, Seite 29) verwendet. Sie werden teilweise ergänzt durch Kennlinien, die durch die Skalierung der Achsen und einzelne Stützpunkte auch eine Parametrierung enthalten, Abbildung 23.

Die Regelung ist eine witterungsgeführte Vorlauftemperaturregelung. Der Vorlauftemperaturregler wirkt auf das Regelkreisventil. Steigt die Vorlauftemperatur schließt das Ventil. Der Sollwert für die Vorlauftemperatur wird durch eine Heizkurvenberechnung ermittelt.

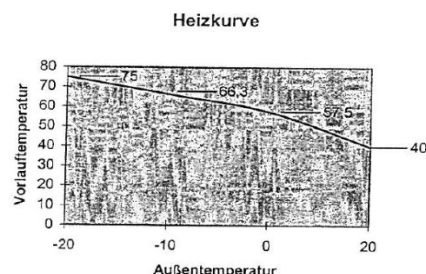


Abbildung 23 Darstellung einer Regelung durch einen Beschreibungstext und eine Kennlinie mit Parametrierung²⁰³

In den Texten der verschiedenen Abschnitte erfolgt neben der Parametrierung auch eine Adressierung mit Datenpunktebezeichnungen des Gebäudeautomationssystems, deren Auswahlkriterien jedoch nicht ersichtlich sind.

Automatikbetrieb

Damit die Anlage vom Zeitprogramm gesteuert werden kann, muß die Hauptschaltadresse in die Stellung Auto geschaltet werden. Beim Ausschalten der Nachtabenkung vom Zeitprogramm wird die Regelung eingeschaltet und das Ventil Batiso zugefahren. Wird die Nachtabenkung aktiviert, wird der Raumtemperatursollwert 2H0210RW01YR um 4K 2H0210NA01YR heruntersetzt.

Nachtabenkung	2H0210NA01SA
Hauptschaltadresse	2H0210HA01SA

Abbildung 24 Darstellung der Parametrisierung und Adressierung in den Beschreibungstexten²⁰⁴

Zeitprogramme, auf die in den Beschreibungen verwiesen wird, werden nicht parametrisiert oder adressiert.

3.1.4 Funktionsbeschreibung Bürogebäude Neumühlen 4²⁰⁵

Die Funktionsbeschreibung des Bürogebäudes der Neumühlen 4 in Hamburg liegt als Dokument im Papierformat A4 und Dateiformat pdf vor und ist vollständig in schwarz-weiß dargestellt. Die Unterlage umfasst 19 Seiten. Sie enthält überwiegend textliche Beschreibungen sowie Tabellen zur Auflistung der beschriebenen Anlagen. Die Titelseiten der drei einzelnen Unterlagen tragen die Logos des Fachplaners TGA („Intec Versorgungstechnik GmbH & Co KG“) sowie des Errichters des Gebäudeautomations-systems („Dieter Schmadtke Elektronik GmbH“).

Die Funktionsbeschreibung ist in drei Teile entsprechend der Informationsschwerpunkte gegliedert. Diese beschreiben jeweils eine Lüftungsanlage bzw. die Wärme- und Kälteerzeugungsanlage. Die Anlagenbeschreibungen sind wiederum in einzelne Abschnitte entsprechend der versorgten Bereiche („Büro“, „WCs“) und einzelner Funktionen („Betriebszeiten“, „Ventilatorüberwachung“ etc.) unterteilt.

Die Darstellung verwendet ausschließlich textliche Beschreibungen. Es werden zwar einzelne Betriebszustände dargestellt, jedoch werden keine Angaben zur Regelung der Anlagen in den Zuständen gemacht. Eine Parametrisierung erfolgt nicht.

Zur Beschreibung von Zustandswechseln werden Bedingungen im Text beschrieben und teilweise auch Vergleichsoperanden zur Parametrierung von Grenzwerten verwendet, Abbildung 25.

1.2 Ermittlung des Betriebsfalls Sommer und Winter

Ob geheizt oder gekühlt werden soll, wird in Abhängigkeit der Außentemperatur ermittelt. Es erfolgt folgende Auswertung:

Der Außentemperatur wird zu folgenden Zeitpunkten gemessen:

06:00, 10:00, 15:00 Uhr. Die Summe aller Messungen wird durch drei geteilt und für die Umschaltung genutzt wie folgt:

Ermittelte Außentemperatur $< 17^{\circ}\text{C}$ ist gleich Heizungsfall $< 16^{\circ}\text{C}$
Ermittelte Außentemperatur $> 20^{\circ}\text{C}$ ist gleich Kühlfall $> 18^{\circ}\text{C}$

boc
Stand 23.1.08

Ist die Außentemperatur innerhalb der beiden Werte, erfolgt keine Versorgung (Nullenergieband).

Abbildung 25 Darstellung^{xi} der Bedingungen für Wechsel der Betriebszustände²⁰⁶

Zeitprogramme werden als Text mit kurzen eingeschobenen Tabellen dargestellt und parametrisiert, Abbildung 26.

1.3.3 Betriebszeiten

Die Ansteuerung der Anlage erfolgt über Zeitprogramm.

Mo. - Fr.: 7.00 Uhr - 18.00 Uhr „EIN“
Sa.: 8.00 Uhr - 16.00 Uhr „EIN“

In der übrigen Zeit „Aus“.

Abbildung 26 Darstellung eines Zeitprogramms²⁰⁷

Die Funktionsbeschreibung enthält keine Adressierung. Änderungen der Dokumente sind auf Grund des pdf-Formats nicht unmittelbar möglich.

^{xi} Markierungen und handschriftliche Eintragungen sind in der Originalunterlage nicht vorhanden, sondern erfolgten im Rahmen der Bearbeitung durch das IGS. Eine ähnliche Fortschreibung, wie sie im Zuge einer Inbetriebnahme zur Aktualisierung zwingend erforderlich ist, wurde in keiner Funktionsbeschreibung festgestellt.

3.1.5 Funktionsbeschreibung Volkswagen Bibliothek Berlin²⁰⁸

Die Funktionsbeschreibung der Volkswagen Bibliothek Berlin liegt in drei separaten Dokumenten vor. Die drei Dokumente sind Teil der Dokumentation des Errichters des Gebäudeautomationssystems (Kieback & Peter GmbH & Co. KG).

Das erste Dokument mit der Bezeichnung „Funktionsbeschreibung“ liegt im Papierformat A4 mit zwei Planunterlagen im A3-Format und als Datei im pdf-Format vor. Es ist vollständig in schwarz-weiß dargestellt. Die Unterlage umfasst 41 Seiten einschließlich der beiden Pläne. Sie enthält überwiegend textliche Beschreibungen sowie einige Tabellen und grafische Darstellungen von Kennlinien.

Die Funktionsbeschreibung ist entsprechend der Anlagen in fünf Abschnitte gegliedert. Die Beschreibung der Heizsysteme und der „Lüftung Hörsaal“ erfolgt in einem ersten Teil (Abschnitte 1-3, 28 Seiten). Es schließen zwei Teile an, die die „Lüftung Küche“ (Abschnitt 4, 9 Seiten) sowie die „Sorptionskühlung für die Anlage 4 »Rara«“ (Abschnitt 5, 5 Seiten) beschreiben.

Im ersten Teil werden die „Steuerungsfunktionen“ textlich beschrieben. Enthalten sind hier Zeitprogramme und ereignisabhängige Umschaltungen zwischen Betriebszuständen. Eine Parametrisierung, Parametrierung oder Adressierung erfolgt nicht.

Die „Regelungsfunktionen“ werden in Texten mit Begriffen wie „witterungsgeführte Vorlauftemperaturregelung“ oder „Festwertregelung“ verwendet. Sie werden teilweise ergänzt durch Grafiken. Diese enthalten zum einen Scharen von Kennlinien mit skalierten Achsen, die im begleitenden Text erläutert werden. Die Beschreibungen sind allgemein gehalten und beziehen sich nicht direkt auf die Funktion des Gebäudes, Abbildung 27.

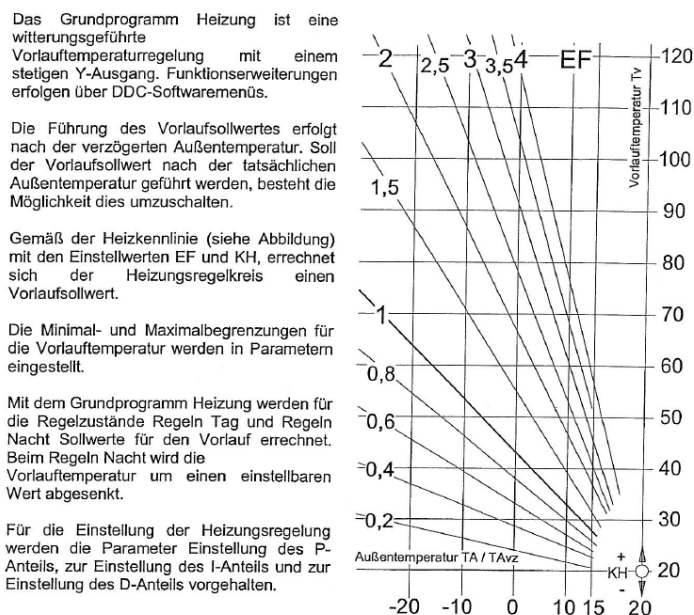


Abbildung 27 Darstellung einer Schar von Kennlinien für die Regelung der Vorlauftemperatur von Heizungsanlagen²⁰⁹

Die textliche Beschreibung verweist auf verschiedene Funktionen, die in der Beschreibung nicht erläutert werden und nicht nachvollzogen werden können („eingestellte Heizkennlinie“, Seite 18, „DDC-Softwaremenü Raumkorrektur und Heizung optimieren“, Seite 20); Zeitprogramme werden erwähnt, jedoch nicht parametrisiert.

Die Wechselbedingungen zwischen einzelnen Betriebszuständen werden für einige Funktionen in Tabellen Form dargestellt, Abbildung 28.

Ein- und Ausschaltbedingungen der Funktion Economy:

	Kessel Umwälzpumpe	EF < 1,0 (Fußbodenheizung)	EF > 1,0 (Radiatorheizung)
	Aus	TVSoll < TRSoll	TVSoll < TRSoll + 5K
	Ein	TVSoll > TRSoll + 2K	TVSoll > TRSoll + 7K

Abbildung 28 Tabellarische Darstellung von Wechselbedingungen zwischen Betriebszuständen²¹⁰

In den Teilen 2 und 3 folgt die Funktionsbeschreibung einem völlig anderen formalen und inhaltlichen Aufbau. Den beiden Teilen ist jeweils das Anlagenschema als Planunterlage vorangestellt, Abbildung 29.

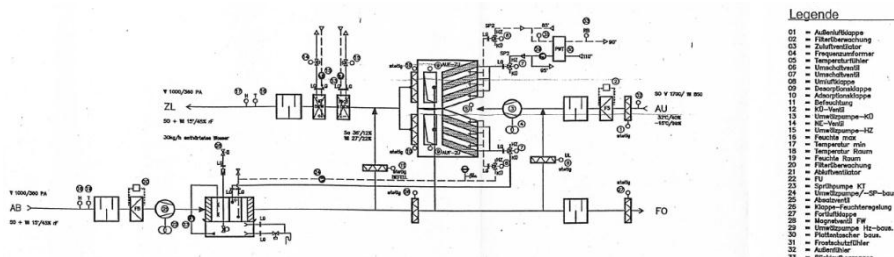


Abbildung 29 Anlagenschema (Format A3)²¹¹

Anschließend sind sämtliche Bauteile der Anlage in tabellarischer Form jeweils mit einer textlichen Beschreibung ihrer Funktion aufgeführt. Dabei erfolgen auch Parametrisierungen, Abbildung 30.

Funktionsbeschreibung Sorptionskühlung
für die Anlagen 1 "Magazin", 2 "Freihand", 3 "Lesesaal"

Pos.	Gegenstand	Funktion
1	1 St. Außentemperaturfühler 24 V 0-10 V	Montage am Wetterschutzgitter, schaltet die 3 Jahreszeiten: Winter von -15 bis 15° C = I. Jahreszeit, Übergang von 15,1 bis 17° C = II. Jahreszeit, Sommer von 17,1 bis 32° C und höher = III. Jahreszeit
2	1 St. Außenluftklappe, 230 V, auf/zu, mit Federrücklauf	Anlagenbetrieb - Klappe auf, Anlagenstillstand - Klappe zu. Sommer + Übergang - 100% auf.
3	3 St. Filterüberwachung 230 V	Filtergüteklassen: G4 F5 F7 Anfangswiderstand: 50 Pa 80 Pa 130 Pa Filterwechsel: 150 Pa 200 Pa 250 Pa max. Endwiderstand: 200 Pa 250 Pa 350 Pa

Abbildung 30 Tabellarische Darstellung der Anlagenbauteile mit Funktionsbeschreibungen²¹²

Die Tabellen umfassen 50 (Abschnitt 4) bzw. 33 Seiten (Abschnitt 5). Eine Adressierung der dargestellten Datenpunkte wird nicht dargestellt.

Das zweite Dokument, bezeichnet als „Regelschemata“, liegt ebenfalls im Papierformat A4 und als Datei im pdf-Format vor. Es ist vollständig in schwarz-weiß dargestellt. Die Unterlage umfasst 39 Seiten. Es enthält je Seite ein Anlagenschema in Anlehnung an VDI 3814, jedoch ohne Darstellung der Regelstruktur oder Regeldiagramme, siehe Abbildung 31. Autor der Unterlage ist der TGA-Planer (WMP-Ingenieure).

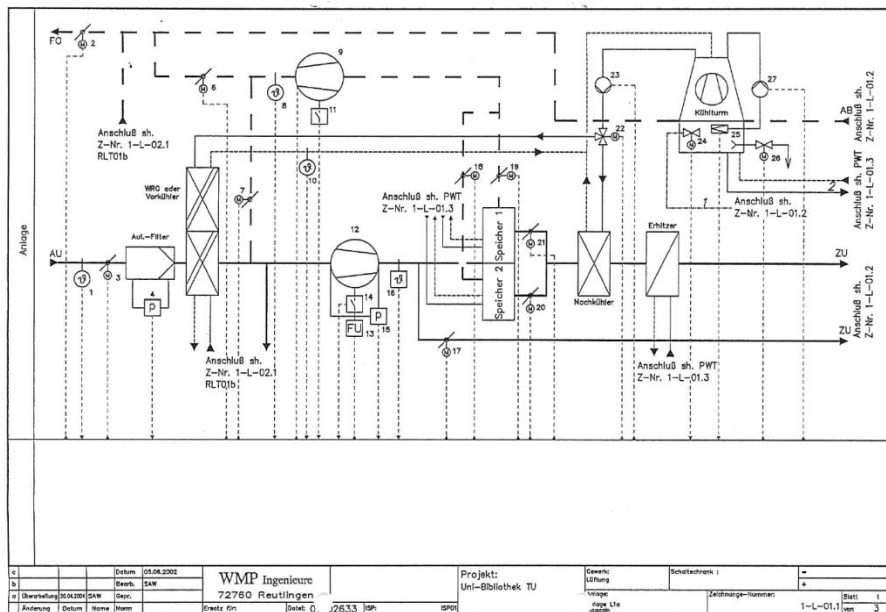


Abbildung 31 Darstellung eines Anlagenschemas²¹³

Die Grafiken, die als gestrichelte Linien Markierungen der einzelnen Datenpunkte enthalten, wurden vermutlich zur Verarbeitung im Zuge der Planung und Errichtung der MSR-Anlage erstellt. Eine Kennzeichnung der Datenpunkte ist in der Grafik nicht dargestellt.

Das dritte Dokument liegt wie die anderen Dokumente im Papierformat A4 und als Datei im pdf-Format vor. Es ist vollständig in schwarz-weiß dargestellt und umfasst 32 Seiten. Die Unterlage enthält eine Liste der Datenpunktadressen des Gebäudeautomationssystems mit Klartexten. Die Datenpunkte sind den einzelnen Anlagen zugeordnet und in analoge und binäre Soll- und Istwerte gruppiert, Abbildung 32.

iii. Plattenwärmetauscher 01a und b

vgl. GLT-Anlagenbild: RLT-1_PWT.px

Art der Datenpunkte: analoge Istwerte

technische Adresse	Klartext
001.001.000 y0007/01	BIB KG R01.0 Magazin Regelventil Nacherh.
001.001.000 b0006/01	BIB KG-R01.0 Magazin WT-RL-Temp. prim. XI

Art der Datenpunkte: binäre Istwerte

technische Adresse	Klartext
001.001.000 k0017/01	BIB KG R01.0 Magazin Pumpe Heizg WT sek. BM
001.001.702 k0008/01	BIB KG R01.0 Magazin Frostschutz Anlage SM
001.001.702 k0011/01	BIB KG R01.0 Mag. Umsch.-Ventil VL-SP1 Kühlen Auf
001.001.702 k0012/01	L1-Magazin 8:Umschalt-Ventil HZ/KÜ 1.1.1 BM Zu
001.001.702 k0013/01	BIB KG R01.0 Mag. Umsch.-Ventil RL-SP1 Kühlen Auf
001.001.702 k0014/01	L1-Magazin 8:Umschalt-Ventil HZ/KÜ 1.1.2 BM Zu
001.001.702 k0015/01	BIB KG R01.0 Mag. Umsch.-Ventil VL-SP2 Kühlen Auf
001.001.702 k0016/01	L1-Magazin 9:Umschalt-Ventil HZ/KÜ 1.2.1 BM Zu
001.001.702 k0017/01	BIB KG R01.0 Mag. Umsch.-Ventil RL-SP2 Kühlen Auf
001.001.702 k0018/01	L1-Magazin 9:Umschalt-Ventil HZ/KÜ 1.2.2 BM Zu
001.001.703 k0017/01	BIB-KG R01.a Magazin Pumpe Vorkühler BM
001.001.703 k0019/01	BIB KG-R01.b Magazin Pumpe Vorkühler BM

Abbildung 32 Datenpunktliste mit Klartextbezeichnungen²¹⁴

In der Unterlage wird kein Autor genannt. Sie ist jedoch Teil der Dokumentation des Errichters der Gebäudeautomationsanlage.

3.1.6 Funktionsbeschreibung Bürogebäude Gelsenwasser²¹⁵

Die Funktionsbeschreibung des Bürogebäudes Gelsenwasser liegt als Dokument im Papierformat A4 und Dateiformat pdf vor und ist vollständig in schwarz-weiß dargestellt. Die Unterlage umfasst 11 Seiten. Sie enthält überwiegend textliche Beschreibungen, einige Tabellen und als Abbildung einen vereinfachten Zustandsgraphen.

Die Funktionsbeschreibung ist in zwei Abschnitte gegliedert: die Beschreibung der Anlagen Heizung / Kühlung (5 Seiten) sowie der Wärmepumpenanlage (6 Seiten). Es wird auf Anlagenteile verwiesen, die nicht in dieser Funktionsbeschreibung enthalten sind.

Die Anlagen sind zwar als getrennte Teile dargestellt, werden jedoch inhaltlich als eine Anlage beschrieben. Hierzu werden weder eine Anlagengrafik noch Darstellungen von Regelstrukturen oder Regeldiagramme verwendet. Der Aufbau der Anlage wird ausschließlich textlich beschrieben und unmittelbar kombiniert mit Beschreibungen der entsprechenden Funktionen, Abbildung 33.

Das neue Gebäude wird mittels einer Wärmepumpenanlage mit vier Verdichtern beheizt und gekühlt. Dabei wird die Geothermie sowohl über eine Temperaturanhebung durch die Wärmepumpe auf ein nutzbares Temperaturniveau zum Heizen verwendet, als auch im Sommer direkt zur statischen Kühlung des Alt- und Neubaus über entsprechende Flächenkühlsysteme. Als Energieträger dient dazu ein Wasser/Glykologemisch, welches über Erdsonden in etwa 150 m Tiefe den Energieaustausch realisiert.

36 x

Abbildung 33 Textliche Erläuterung^{xii} des Anlagenaufbaus und einzelner Funktionen²¹⁶

Zur Erläuterung der Funktionsweisen werden drei Betriebszustände textlich bzw. in angedeuteter Tabellenform dargestellt, Abbildung 34

- Heizbetrieb (mit Freier Kühlung): Heizen und Kühlen, wobei die abgeforderte Heizleistung betriebsbestimmend ist.
- Freie Kühlung (ohne Heizung): Die Kühlung erfolgt direkt über die Erdsonden. Die Verdichter der Wärmepumpe sind dabei nicht in Betrieb.
- Kältebetrieb (ohne Heizung): Kühlen, wobei die abgeforderte Kälteleistung betriebsbestimmend ist.

Abbildung 34 Textliche Erläuterung der Betriebszuständen einer Wärmepumpenanlage²¹⁷

Die Bedingungen für die Betriebsübergänge werden anschließend wieder textlich mit dem Terminus „Umschaltung ... erfolgt, sobald ...“ beschrieben, Abbildung 35.

Eine Umschaltung von **Freie Kühlung** (ohne Heizung) in den **Heizbetrieb** (mit Freie Kühlung) erfolgt, sobald ...

- ✓ ... eine Bürozone (28 Stück + Konferenzraum 7.OG) des Transparenten Gebäudes Wärme anfordert und dieses Signal mindestens 30 min ansteht. Die Signale der 28 + 1 Zonen werden von LON erzeugt und an die DDC weitergegeben.

Abbildung 35 Textliche Erläuterung der Übergänge zwischen den Betriebszuständen einer Wärmepumpenanlage²¹⁸

^{xii} Unterstreichungen und handschriftliche Eintragungen sind in der Originalunterlage nicht vorhanden, sondern erfolgten im Rahmen der Bearbeitung durch das IGS.

Als Zusammenfassung wird am Ende der Funktionsbeschreibung ein schematischer Zustandsgraph zur Beschreibung der Betriebszustände und der entsprechenden Übergänge dargestellt, Abbildung 36.

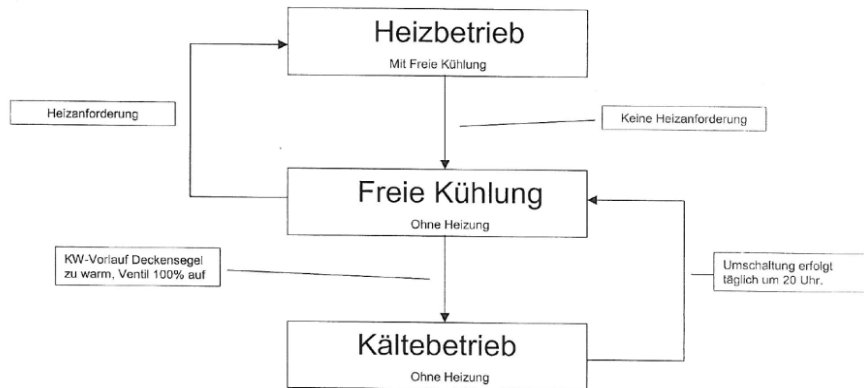


Abbildung 36 Schematischer Zustandsgraph für den Betrieb einer Wärmepumpenanlage²¹⁹

Die Funktionsbeschreibung enthält im Text zahlreiche Parametrierungen, z.B. von Raum-Solltemperaturen und Systemtemperaturen der Heiz- und Kühlanlagen. Eine Adressierung der Datenpunkte mit Bezug auf die ausgeführte Anlage erfolgt nicht.

3.1.7 Fazit

Die Analyse der Funktionsbeschreibungen zeigt eine Vielfalt von Strukturen, Beschreibungsmitteln und Inhalten. In Bezug auf die Anforderung einer präzisen Spezifikation von Funktionen, weisen sie erhebliche Defizite auf:

- Das Format der Dokumente ist in allen Fällen ein Textdokument, teilweise um Grafiken und Planunterlagen ergänzt, im Dateiformat doc oder pdf, oder als ausgedruckte Unterlage. Mit Blick auf den Anwendungsprozess in Bauprojekten, in dem Funktionen verändert, optimiert und an Nutzungen angepasst werden (sollen), sind solche „nicht-pflegbaren“ Formate wenig geeignet: Laut GEFMA 124 sind die Anlagen zu optimieren und die Optimierung zu dokumentieren. Dies ist in diesem Unterlagenformat in der Praxis nicht praktikabel.
- Anlagenaufbau sowie Steuer- und Regelfunktionen werden in allen Beschreibungen dargestellt. Insbesondere, wenn die Unterlagen offensichtlich vom Hersteller der Gebäudeautomation stammen, sind die Beschreibungen ausführlich, oft jedoch auch ohne direkten Bezug zum konkreten Gebäude dargestellt.
- Sehr individuell erfolgen die Parametrisierung – als Erwähnung einer Größe im Text, als Teil einer Grafik – sowie Adressierung und Parametrierung – im Text, in separaten Tabellen, oft auch gar nicht. Ohne diese Angabenkette (Sensor mit Adresse → Steuer-/Regelfunktion → Aktor mit Adresse) können Funktionen jedoch nicht eindeutig im Kontext des Gebäudes oder der Anlage nachvollzogen werden. Eine Abnahme oder kontinuierliche Prüfung ist nicht möglich.

Diese Analyse zeigt, dass in der Praxis offenbar weder eine einheitliche noch eine den Anforderungen gerecht werdende Konvention oder gar spezielle Werkzeuge zur Erstellung von Funktionsbeschreibungen vorliegen. Besonders evident ist die Trennung zwischen Planung und Betrieb von Gebäuden bzw. – aus Sicht der Qualitätssicherung – zwischen Spezifikation und Überprüfung.

4 THESE UND METHODIK

In seinem betriebswirtschaftlichen Standardwerk „Einführung in die Betriebswirtschaftslehre“²²⁰ beschreibt Wöhe, dass Planungsziele konsequenterweise auch überwacht werden müssen. Das Paar aus Planung und Überwachung bezeichnet er mit dem Begriff „Controlling“²²¹: Es „geht, obwohl man vom Wortstamm her eine ähnliche Bedeutung vermuten könnte, über die Überwachungsfunktion hinaus, da er auch Planung und Steuerung mit einbezieht“²²².

Ein zentrales Prinzip eines Controlling-Prozesses ist die Spezifikation von Zielen und deren Überprüfung. Im Rahmen eines Gebäude-Monitorings erfolgt die Überprüfung unter Verwendung von (Mess-)Daten aus dem Gebäudebetrieb. Messung und Datenerfassung erfolgen in der Regel über Gebäudeautomationssysteme, die auch zur Steuerung und Regelung von Betriebsabläufen dienen, oder mit Hilfe zusätzlicher Messsysteme.

Während die Erfassung von Daten heute eine Standardfunktion von Gebäudeautomationsanlagen ist, sind, wie oben beschrieben, die methodischen Vorgaben für die Spezifikation der Ziele weitgehend unpräzise und als Grundlage für die Bewertung der Ergebnisse ungeeignet. Eine einheitliche Methodik hat sich in der Praxis trotz intensiver Forschung nicht durchgesetzt.

Im Bericht zum VTT Symposium 2001 „Demonstrating Automated Fault Detection and Diagnosis Methods in Real Buildings“ steht dazu der bemerkenswerte Satz: „Although quantitative performance criteria can be and have been defined, it is sometimes difficult to apply them, particularly in real buildings“²²³.

4.1 These

Diese Arbeit definiert mit der Aktiven Funktionsbeschreibung eine umfassende Methodik zur Spezifikation und Prüfung von Funktionen gebäudetechnischer Anlagen und weist praktische Anwendungsmöglichkeiten nach. Innovativer Kern ist die Umsetzung eines Controllingkonzepts aus Spezifikation und Überprüfung mit einem einzigen durchgängigen Beschreibungsmittel. Dazu wird folgende These aufgestellt:

Mit Aktiven Funktionsbeschreibungen können Funktionen von Gebäuden und Anlagen sowohl in der Planung spezifiziert als auch im Betrieb in Bezug auf die Erreichung eines festgelegten, mindestens zu erreichenden Grades der Übereinstimmung mit der Planung überprüft werden.

Die folgenden Abschnitte erläutern die Methodik des Nachweises.

4.2 Methodisches Vorgehen

Der Nachweis der These wird anhand mehrerer Funktionen dreier typischer gebäudetechnischer Anlagen sowie der entsprechenden konventionellen Funktionsbeschreibungen und von Betriebsdaten der Anlagen aus der Praxis geführt. Dabei werden Funktionen einer Anlage jeweils zu-

nächst einzeln und dann in Kombination untersucht. Die Nachweisführung folgt weitgehend einer praktischen Anwendung in einem Bauprojekt. Im Einzelnen werden folgende Schritte bearbeitet:

1. Analyse der konventionellen Funktionsbeschreibung

Für die einzelnen Anlagen wird die vorliegende, konventionelle Funktionsbeschreibung analysiert. Die angestrebte Funktion wird herausgearbeitet. Mögliche Defizite der Spezifikation werden identifiziert.

2. Spezifikation des Zustandsraums

Es wird nachgewiesen, dass eine Spezifikation von Anlagenfunktion mit der Aktiven Funktionsbeschreibung möglich ist. Dazu wird ein Zustandsraum definiert. Die im Zustandsraum spezifizierten Betriebszustände werden zunächst bewusst möglichst einfach gehalten, um einzelne Eigenschaften bewerten zu können: Betriebszustände enthalten maximal eine, jeweils gleiche technisch-physikalisch Größe als Eigenschaft. Falls nach der Analyse der konventionellen Funktionsbeschreibung noch Teile der Spezifikation unklar sind, werden diese auf Basis der Betriebsdaten soweit möglich sinnvoll ergänzt (z.B. Betriebszeiten von Anlagen).

Für jede Anlage wird anschließend auch ein Zustandsautomat für die Kombination der analysierten Funktionen spezifiziert und ausgewertet.

3. Auswertung des Zustandsraums

Es wird gezeigt, dass die Betriebsdaten mit der Aktiven Funktionsbeschreibung in Bezug auf die Übereinstimmung mit der Spezifikation ausgewertet werden können.

Dazu werden die Zustandsräume für die ausgewählten Betriebsdaten ausgewertet. Für die Bearbeitung wird jeweils ein Datensatz von einem Jahr ausgewählt. Es sollen in den ausgewählten Daten sowohl eine für das System korrekte Funktion vorliegen, aber soweit möglich auch typische Fehlfunktionen. Fehlfunktionen werden in Bezug auf die Ursachen analysiert und soweit möglich in system- und qualitätsbedingte Fehler differenziert. Für Abweichungen werden geeignete Grenzwerte definiert.

Die Betriebszustände und Zustandsräume werden ausgewertet, so dass für jeden Zeitpunkt ein boolescher Wert für den Zustandsraum vorliegt.

Die Betriebsgüte – die relative Häufigkeit der Zeitpunkte, für die der Zustandsraum innerhalb einer Zeitspanne als gültig ausgewertet wurde – wird für die in der Praxis zur Prüfung geeigneten Zeitspannen Tag, Woche, Monat, Vierteljahr und Jahr berechnet. Die erreichten Werte sind – entsprechend der aufgestellten These – ein Maß für die Übereinstimmung von Planung und Betrieb. Aus Ihnen werden Grenzwerte als Mindestanforderungen an die Betriebsgüte abgeleitet.

Damit wird der Nachweis erbracht, dass mit dem Darstellungsmittel der Aktiven Funktionsbeschreibung Funktionen spezifiziert und in Bezug auf ein definiertes Maß an Übereinstimmung zwischen Planung und Betrieb geprüft werden können.

4.3 Vorarbeiten

Die Aktive Funktionsbeschreibung wird im Folgenden als Planungs- und Prüfkonzept für Gebäudefunktionen vorgestellt. Die Methode wurde vom Autor im Rahmen des Forschungsprojekts Energie-Navigator mit Förderung des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (FKZ: 0327444A) am Institut für Gebäude- und Solartechnik, Univ.-Prof. Dr.-Ing. M. Norbert Fisch, der Technischen Universität Braunschweig in Zusammenarbeit mit Dipl.-Inform. Claas Pinkernell am Lehrstuhl Software Engi-

neering, Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Bernhard Rumpe, der RWTH Aachen entwickelt. Teile der Methodik wurden im Verlauf des Projekts in mehreren Publikationen des Autors unter anderem mit den oben genannten beteiligten Wissenschaftlern veröffentlicht. Eine Liste der Veröffentlichungen ist in Abschnitt 8.1 angehängt. Im Rahmen des Forschungsprojekts wurden Ansätze der Methodik in vom Autor betreuten Masterarbeiten von Hein²²⁴ und Del Vecchio²²⁵ untersucht. Weitere Arbeiten, insbesondere in Bezug auf die Entwicklung der domänenspezifischen Sprache zur Darstellung von Zustandsräumen und zur Entwicklung einer entsprechenden Software, werden am Lehrstuhl Software Engineering erstellt.

4.4 Abgrenzung

Diese Arbeit beschränkt sich auf den Nachweis der Eignung Aktiver Funktionsbeschreibungen für die funktionale Qualitätssicherung von Gebäuden und Anlagen. Das Konzept der Aktiven Funktionsbeschreibung eröffnet darüber hinaus jedoch umfangreiche neue Felder für Forschung und Entwicklung sowie für Dienstleistungen im Baubereich, die hier jedoch nicht behandelt werden. Zu Klärung werden im Folgenden einige inhaltliche und formale Aspekte abgegrenzt.

4.4.1 „Überprüfung“ und „Optimierung“ des Betriebs

DIN EN ISO 16484 erwähnt als Leistung der Inbetriebnahme die „Überprüfung und Verbesserung der funktionalen Gebäudequalität“²²⁶. In Bezug auf die Aktiven Funktionsbeschreibung besteht ein Unterschied zwischen einer „Überprüfung“ und einer „Verbesserung“ oder „Betriebsoptimierung“.

Aktive Funktionsbeschreibungen sind keine Methode zur Betriebsoptimierung im Sinne einer zielgerichteten Änderung von Funktionen, sondern zur Spezifikation und Überprüfung der Erreichung von vorab in der Planung vorgegebenen, also bekannten Funktionen. Ob die zu Grunde liegende Planung selbst optimal ist, wird nicht bewertet.

4.4.2 Standardisierung

Die Methodik der *Aktiven Funktionsbeschreibung* ist in hohem Maße für eine Standardisierung geeignet. Für Anlagentypen und Zustandsräume können Funktionsbibliotheken erstellt und für Betriebsregeln und -abweichungen einheitliche Grenzwerte entwickelt werden. Die Durchführung entsprechender Untersuchungen in verschiedenen Gebäuden und Anlagen sowie mit unterschiedlichen Automationssystemen wird als wichtiger weiterer Forschungsbedarf gesehen. Diese Arbeit entwickelt hierfür methodische Grundlagen.

4.4.3 Technische Umsetzung

Die technische Umsetzung einer Software zur Erstellung *Aktiver Funktionsbeschreibungen* erfolgt parallel zu dieser Arbeit. Der in dieser Arbeit verwendete Demonstrator wurde im Forschungsprojekt „Energie-Navigator“ in Zusammenarbeit zwischen dem IGS – Institut für Gebäude- und Solartechnik und dem Lehrstuhl Software Engineering der RWTH Aachen entwickelt. Ein entsprechendes Softwareprodukt wird von der synavision GmbH entwickelt.

4.5 Technische Grundlagen

Die Umsetzung der Aktiven Funktionsbeschreibung erfolgt mit Hilfe der Software Energie-Navigator (Version 1.0.3), deren Grundlagen im gleichnamigen Forschungsprojekt entwickelt und die von der Synavision GmbH als Produkt umgesetzt wurde. Außerdem wurde das Kalkulationsprogramm Excel (Version 2007) der Microsoft Corporation verwendet. Die Gebäudeautomationssysteme und die zur Datenerfassung eingesetzte Software werden jeweils im Kontext der einzelnen Anlagen beschrieben.

4.6 Grafische Darstellungen für Betriebsdaten

Als wichtiges Darstellungsmittel werden in der Arbeit Rastergrafiken bzw. Carpetplots verwendet. Sie ermöglichen eine kompakte Darstellung langer Zeitreihen, indem die Daten in ihrer Chronologie zweidimensional und den Werten entsprechend einer Farbskala angeordnet werden. Zum besseren Verständnis wird die Grafik am Beispiel von Abbildung 37 erläutert.

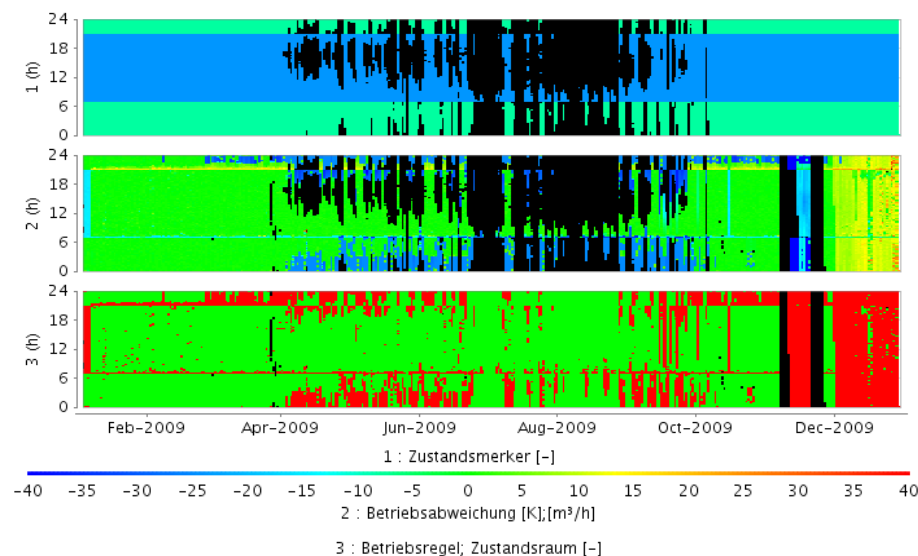


Abbildung 37 Beispiele von Rastergrafiken für die Darstellung von Betriebszuständen (1), Betriebsabweichungen (2) sowie Betriebsregeln und Zustandsräumen (3)

Jede Spalte enthält die 96 viertelstündlichen Werte eines Tages von unten nach oben. Die 365 Tage sind in den Spalten von links nach rechts angeordnet. Es werden unterschiedliche Farbskalen für die verschiedenen darzustellenden Daten verwendet.

1. Für die Darstellung der Betriebszustände (oberes Rasterdiagramm) werden die Farben Schwarz/Blau/Grün verwendet (Farbskala nicht dargestellt).
2. Für die Darstellung von Betriebsabweichungen wird eine stufenlose Farbskala von Blau über Grün nach Rot verwendet.
3. Die booleschen Werte für die Gültigkeit von Betriebsregeln und Zustandsräumen werden in grün (=gültig) und rot^{xiii} (=ungültig) dargestellt (Farbskala nicht dargestellt).

Rasterdiagramme sind besonders geeignet, um zeitliche Rhythmen innerhalb der Daten zu erkennen. Sie unterstützen deshalb die Analyse der Betriebsdaten und Identifikation von Ursachen für Betriebsfehler.

^{xiii} Auf Grund eines Visualisierungsfehlers sind einige rote Werte schwarz dargestellt.

5 AKTIVE FUNKTIONSBESCHREIBUNGEN

Mit dem Konzept Aktiver Funktionsbeschreibungen wird eine entsprechend dem Controlling-Gedanken gestaltete durchgängige Methodik für die Spezifikation und Überprüfung des Betriebs von Gebäuden und Anlagen entwickelt²²⁷. Aktive Funktionsbeschreibung ermöglichen es, Eigenschaften (Sollwerte) von Anlagen, sowohl der Sensorik als auch der Aktorik, innerhalb bestimmter Betriebszustände zu beschreiben. Anhand der Beschreibung wird unter Verwendung von Betriebsdaten (Istwerten) überprüft, ob die Funktion im Betrieb mit den Vorgaben übereinstimmt. Für die Überprüfung durch Vergleich und Bewertung werden die Begriffe *Betriebsabweichung (BA)* und *Betriebsgüte (BG)* als Maß und Indikator für die Qualität der Übereinstimmung zwischen Planung und Betrieb eingeführt.

In der Spezifikation werden in der Planungsphase Funktionen von Gebäuden und Anlagen definiert. Die Betriebsmessung umfasst die tatsächliche technisch-physikalische Messung sowie die Erfassung virtueller Datenpunkte aus der Gebäudeautomation sowie die Verarbeitung dieser Daten. Die Betriebsregeln werden dann auf ihre Gültigkeit unter Verwendung der Betriebsdaten überprüft.

Methodische Grundlage für die Darstellung und Prüfung von Funktionen ist ein Konzept von anwendungsspezifisch vereinfachten Zustandsautomaten. Das in Abschnitt 2.3.2 bereits angesprochene Konzept der Zustandsautomaten wird dazu auf die Beschreibungsmittel *Zustandsraum*, *Betriebszustand* und *Betriebsregel* reduziert. Auf Übergänge und die entsprechenden Bedingungen wird verzichtet. Im Folgenden wird das für *Aktiven Funktionsbeschreibungen* entwickelte Konzept von Zustandsräumen vorgestellt^{xiv}.

5.1 Betriebsregeln BR und Eigenschaften

Eine *Betriebsregel BR* beschreibt eine Eigenschaft einer Anlage zu einem Zeitpunkt als logisches Argument. Eine Betriebsregel ist für einen Zeitpunkt t gültig, wenn das spezifizierte logische Argument für die für diesen Zeitpunkt übergebenen Betriebsdaten gültig ist, siehe als Beispiel Gleichung 1.

Gleichung 1 Betriebsregel BR_t : $T_{VL,t} > 45^\circ\text{C}$

mit

$T_{VL,t}$ Betriebsdaten der Vorlauftemperatur zum Zeitpunkt t .

Die Betriebsregel wird in der *Aktiven Funktionsbeschreibung* definiert. Im Betrieb werden der Regel die Betriebsdaten für die Vorlauftemperatur zugewiesen. Für alle Zeitpunkte t , an denen die Vorlauftemperatur größer als 45°C ist, wird die Betriebsregel als gültig ausgewertet.

Als Eigenschaft von Gebäuden und Anlagen werden überwiegend physikalische Größen wie Temperatur, Druck oder Volumenstrom definiert. Dies können aber auch betriebstechnische Merkmale von Anlagen wie Betriebsmeldungen der Gebäudeautomation für die Aktorik oder einzelner Teilanlagen (z.B. EIN/AUS [-], Ventilstellung [%]) sowie Zählerwerte (z.B. für Betriebsstunden) oder Anlagenkennwerte definiert werden. Tabelle 1 zeigt eine Übersicht möglicher Funktionen.

^{xiv} An Stelle des Begriffs „Zustandsautomat“, der das methodische Konzept beschreibt, und dem Begriff „Zustandsgraph“, der die grafische Beschreibung des Automaten meint, wird im Weiteren der Begriff „Zustandsraum“ verwendet, der die spezifisch Anwendung beschreibt.

Tabelle 1 Technisch-physikalische Eigenschaften gebäudetechnischer Anlagen (Beispiele)

Eigenschaft	Einheit
Sensorik	
Systemtemperatur	°C
Volumenstrom	m³/h; l/s
Druck	Pa
Elektrische Leistung	W
CO ₂ -Gehalt	ppm
Aktorik	
Ventilstellung	0/1; %
Klappenstellung	0/1; %
Teil-Anlage	0/1 (Freigabe), % (Vorgabe)
Betriebsstunden	h; h/a
Betriebsmeldungen	
Betriebszustand	Ein / Aus
Freigabe	ja / nein

5.2 Beschreibungsmittel

Zur Beschreibung von Betriebsregeln können in der *Aktiven Funktionsbeschreibung* verschiedene Beschreibungsmittel verwendet werden. Im Einzelnen sind dies:

- Regeln (Rules)
- Funktionen (Functions)
- Festwerte (Constants)
- Kennlinien (Characteristics)
- Zeitprogramme (Time Routine)
- Metriken (Metrics)

Eigenschaften werden in der Planung mit Regeln spezifiziert. Im Betrieb werden die Regeln unter Verwendung von Betriebsdaten ausgewertet. Die Beschreibungsmittel sind Teil einer domänenspezifischen Sprache, die im Rahmen des Forschungsprojekts Energie-Navigator entwickelt und definiert wurden²²⁸.

5.2.1.1 Regeln

Eine Regel ist eine Zuweisung, die immer zu einem booleschen Wahrheitswert, also TRUE (1) oder FALSE (0), ausgewertet wird. Regeln sind das zentrale Beschreibungsmittel in der Aktiven Funktionsbeschreibung. Sie spezifizieren die Funktionen einer Anlage als deren Eigenschaften zu bestimmten Zeitpunkten. Ihre Gültigkeit bei Auswertung mit den entsprechenden Betriebsdaten ist Ausdruck der Übereinstimmung des Betriebs mit der Planungsvorgabe.

5.2.1.2 Funktionen

Eine Funktion ist eine Zuweisung unter Verwendung logischer und mathematischer Argumente (siehe 5.2.1.3.). Ergebnis einer Funktion ist eine rationale Zahl. Anwendungsmöglichkeiten sind zum Beispiel die Spezifikation einer witterungsgeführten Vorlauftemperatur oder die Sommerkompensation einer Ablufttemperatur.

5.2.1.3 Anweisungen, logische und mathematische Argumente

Zur Beschreibung von Funktionen und Regeln werden entsprechend der domänenspezifischen Sprache bedingte Anweisungen, relationale Operatoren und mathematische Operatoren eingesetzt. Als Anweisungen und Verzweigungen werden „IF“ (wenn), „THEN“ (dann) und „ELSE“ (sonst) verwendet. Sie werden im Weiteren als Worte wie oben in englischer Sprache ausgeschrieben.

Als logische Verknüpfungen können die Elementarverknüpfungen entsprechend Tabelle 2 verwendet werden.

Tabelle 2 Liste der verwendeten logischen Verknüpfungen

Operation	Darstellungszeichen
UND (AND)	&&
ODER (OR)	
NICHT (NOT)	!
implies ^{xv}	implies

Ein Vergleichsoperator (relationaler Operator) ist ein zweistelliger logischer Operator, also ein Operator, der auf zwei Argumente angewendet wird und einen Wahrheitswert liefert. Vergleichsoperatoren werden vor allem in mathematischen Gleichungen bzw. Ungleichungen und in logischen Ausdrücken von Programmiersprachen verwendet, Tabelle 3.

Tabelle 3 Liste der verwendeten Vergleichsoperatoren

Operation	Darstellungszeichen
ist gleich	==
ist ungleich	!=
ist kleiner als	<
ist größer als	>
ist kleiner als oder gleich	<=
ist größer als oder gleich	>=

Zur Verknüpfung von Operanden werden die Grundrechenarten Addition, Subtraktion, Multiplikation und Division mit den Zeichen in Tabelle 4 verwendet.

Tabelle 4 Liste der verwendeten mathematischen Operatoren

Operation	Darstellungszeichen
Addition	+
Subtraktion	-
Multiplikation	*
Division	/

^{xv} imply/implies (engl.); deutsch= bedeuten, unterstellen, voraussetzen, hier „impliziert“

5.2.1.4 Festwerte (Constants)

Mit Hilfe eines Festwerts kann ein konstanter Wert als Eigenschaft eines Zustands beschrieben werden. Der Betriebsparameter soll diesen Wert zu jedem Zeitpunkt annehmen, zu dem der entsprechende Zustand vorliegt. Anwendungsmöglichkeiten sind zum Beispiel ein konstanter Volumenstrom einer Lüfterstufe oder die Festwert-Regelung für die Zulufttemperatur einer Lüftungsanlage.

5.2.1.5 Kennlinien (Characteristics)

Kennlinien sind eine anwendungsspezifische Darstellungsform von Funktionen und entsprechen einem Rechenglied nach DIN 19227-2²²⁹. Sie können zur Beschreibung von Eigenschaften verwendet werden, die von einem anderen Betriebswert abhängen, Abbildung 38.

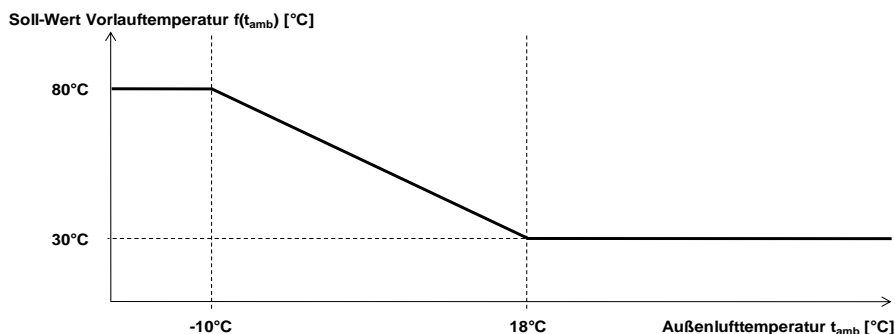


Abbildung 38 Beispiel einer Kennlinie für die Vorlauftemperatur eines Heizkreises

Eine übliche Anwendung ist die Sollwert-Führung²³⁰ für die Vorlauftemperatur über der Außenlufttemperatur in einem Heizkreis.

5.2.1.6 Zeitprogramme (Time Routines)

Zeitprogramme sind in der Gebäudeautomation von besonderer Bedeutung. Mit ihrer Hilfe können Anlagen je nach Bedarf für bestimmte, am Kalender orientierte zeitliche Zyklen betrieben werden. Ein Zeitprogramm ist eine Funktion der Zeit. Ergebnis ist jedoch wie bei einer Regel ein Boolescher Wert.

In der technischen Umsetzung des Energie-Navigators können Zeitprogramme minutengenau für Minuten in der Stunde, Stunden am Tag, Wochentage, Tage im Monat, die Kalendermonate und Jahre im Zeitraum von 1980 bis 2015 definiert werden, Abbildung 39.



Abbildung 39 Zeitprogramm (grün: gültige Zeitpunkte, rot: ungültige Zeitpunkte)

Die einzelnen Angaben werden mit einer UND-Verknüpfung ausgewertet. Im dargestellten Beispiel ist das Zeitprogramm entsprechend mit Ausnahme der Stunden 21 Uhr bis 7 Uhr immer gültig.

5.2.1.7 Metriken (Metrics)

Die oben dargestellten Beschreibungsmittel können alle für die Spezifikation von Eigenschaften einer Anlage zu einzelnen Zeitpunkten verwendet werden. Mit Metriken können Betriebswerte oder Ergebnisse von Funktionen und Regeln über Zeiträume aggregiert werden. Metriken werden deshalb nicht unmittelbar im Konzept der Zustandsräume verwendet, da sie eine Eigenschaft für einen Zeitpunkt weder beschreiben noch auswerten können. Sie werden jedoch für die Berechnung der Betriebsgüte verwendet. Außerdem sind sie ein zentrales Werkzeug für ein konventionelles Monitoring, da sie zur Berechnung von Energieverbrauchswerten genutzt werden können.

Im Demonstrator des Energie-Navigators stehen die Basisfunktionen arithmetisches Mittel, Maximum, Minimum, Summe, Differenz sowie die Anzahl der validen bzw. invaliden Werte zur Verfügung. Als Zeitraum können Minute, Stunde, Tag, Woche, Monat, Vierteljahr und Jahr gewählt werden, siehe Tabelle 5.

Tabelle 5 Liste der Basisfunktionen und Bezugszeiträume

Basisfunktionen	Bezugszeiträume
Arithmetisches Mittel (Average)	Minute
Summe (Sum)	Stunde
Minimum (Min)	Tag
Maximum (Max)	Woche
Anzahl Valider Werte (validvalues)	Monat
Anzahl Invaliden Werte (invalidvalues)	Vierteljahr
	Jahr

5.3 Betriebsabweichung BA

Viele Spezifikationen für technische Anlagen können unmittelbar als Betriebsregel ausgedrückt werden, wie z.B. EIN-/AUS-Vorgaben, die Verriegelung von Funktionen gegeneinander oder auch das Beispiel in Gleichung 1. Insbesondere für die Spezifikation von Regelgrößen der Gebäudeautomation ist zusätzlich ein Maß für die zulässige Abweichung im Betrieb erforderlich. Dies wird mit der *Betriebsabweichung* definiert.

Für technisch-physikalische Größen, die in der Gebäudeautomation über die Sensorik gemessen und erfasst werden, ist es auf Grund von Messungenauigkeiten grundsätzlich nicht möglich, einen in der Aktiven Funktionsbeschreibung spezifizierten Sollwert im Betrieb exakt einzuhalten^{xvi}. Auch Regelabweichungen der Anlagen führen zu nicht vermeidbaren Unterschieden. Die Differenz zwischen der Führungsgröße w und der entsprechenden Regelgröße x wird in der Regelungstechnik als Regelabweichung x_d bzw. Regeldifferenz e bezeichnet, Abbildung 40.

^{xvi} Anforderungen an die Messgenauigkeit bei technischen Prüfungen werden in verschiedenen Normen mit Mindestanforderungen beschrieben. Diese gelten jedoch in der Regel für die Messung im Zuge der Prüfung und nicht für den kontinuierlichen Betrieb der Anlage.

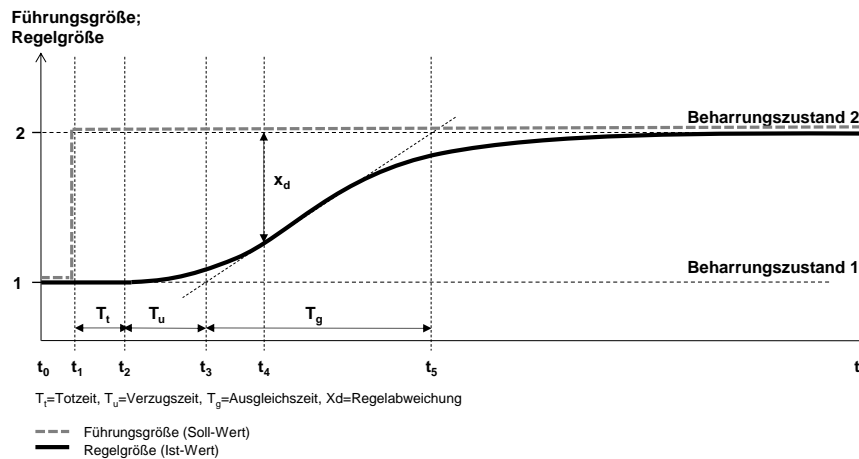


Abbildung 40 Zeitverhalten eines Regelkreises, nach Wellenreuther²³¹

Führungsgröße und Regelgröße sind Teil der Automation und Teil eines Regelkreises. Im Gegensatz dazu ist die Betriebsabweichung die Differenz zwischen der Regelgröße und der entsprechenden Spezifikation in der *Aktiven Funktionsbeschreibung*. Letztere ist nicht Teil des Regelkreises bzw. der Automation. Organisatorisch ist die Spezifikation eine funktionale Anforderung an die Automation. Das heißt, dass sowohl Führungsgröße w als auch Regelgröße x mit der Spezifikation möglichst gut übereinstimmen sollen.

Für eine sinnvolle Bewertung von Istwerten im Betrieb, die unvermeidbare Abweichungen berücksichtigt, muss ein zulässiges Toleranzmaß für Abweichung definiert werden. Hierzu wird die *Betriebsabweichung* BA_t eingeführt. Sie bezeichnet die Differenz zwischen einem Istwert im Betrieb und dem entsprechenden in der Aktiven Funktionsbeschreibung AFB definierten Sollwert zu einem Zeitpunkt t , siehe Gleichung 2.

Gleichung 2 $BA_t = T_{Ist,t} - T_{Soll,t}$

mit

BA_t Betriebsabweichung zum Zeitpunkt t

$T_{Ist,t}$ Istwert zum Zeitpunkt t

$T_{Soll,t}$ Sollwert zum Zeitpunkt t .

Die Betriebsabweichung hat die Einheit des Soll- bzw. Istwerts^{xvii}.

Mit Hilfe der Betriebsabweichung und geeigneten Grenzwerten können entsprechende Größen als Eigenschaften von Anlagen innerhalb von Betriebsregeln definiert werden. Im Konzept der Zustandsräume wird die Betriebsabweichung intern berechnet, jedoch nicht notwendiger Weise als Ergebnis dargestellt. Die Betriebsabweichung wird in dieser Arbeit jedoch explizit berechnet, um geeignete Grenzwerte für einzelne Größen zu bestimmen.

^{xvii} Eine Ausnahme bilden Betriebsabweichungen von in „°C“ angegebenen Temperaturen. Sie werden in „K“ angegeben.

5.4 Abweichungen zwischen Spezifikation und Betrieb

Abweichungen zwischen Soll- und Istwerten können durch Fehler in der Spezifikation, der Errichtung der Anlage oder im Betrieb verursacht werden. Sie können aber auch durch die entsprechenden Systeme bedingt sein und müssen entsprechend in einem bestimmten Maß toleriert werden. Zur Differenzierung werden zwei grundsätzliche Ursachen für Abweichungen definiert.

1. Systembedingte Abweichungen

sind solche Abweichungen, die von den spezifizierten Systemen nicht oder nur mit unangemessenem Aufwand vermieden werden können. Es werden folgende typische systembedingte Abweichungen definiert:

- a. Ein physikalischer Messwert kann auch bei optimaler Umsetzung eines Systems nur mit einer *Messtoleranz* mit einem berechneten Sollwert übereinstimmen.
- b. In Regelkreisen verursacht die verzögerte Nachführung der Regelgröße eine *Regelabweichung*. So kann sich z.B. ein Soll-Wert beim Wechsel von einem Zustand in einen anderen ohne Zeitverzug ändern. Die entsprechende physikalische Größe – ob eine Wassertemperatur oder ein Volumenstrom – kann diesem Sprung nur verzögert folgen. Eine Führungsgröße kann grundsätzlich nur mit einer zeitlichen Verzögerung erreicht werden.
- c. Insbesondere in zeitlicher Nähe zu Transitionen können für einzelne Parameter Zustände auftreten, die durch die *Anlagenfunktion* nicht oder nur mit unverhältnismäßigem Aufwand erfüllt werden können. Wird in einem Kühlsystem eine niedrigere Vorlauftemperatur gefordert, kann die Anlage dies durch Einschalten des Kälteaggregats erreichen. Wechselt die Anlage aber nun in einen anderen Zustand zurück und fordert eine höhere Temperatur, wird für schnellst mögliche Nachführung sicherlich keine Heizfunktion in die Kühlanlage eingebaut. Die Temperatur steigt stattdessen durch die Umgebungswärme.
- d. Fehler können im Zuge der *Datenverarbeitung* durch geringfügig unterschiedliche Speicherzeitpunkte zweier Messdaten z.B. durch unterschiedliche Erfassungssysteme entstehen (z.B. analoges Signal an der Klemme der DDC und Bussystem).

2. Qualitätsbedingte Abweichungen

sind Abweichungen, die nicht systembedingt sind. Es werden folgende typische Ursachen definiert:

- a. Die Anlage hat eine *fehlerhafte Sensorik oder Aktorik*, indem sie schadhaft, falsch kalibriert, fehlerhaft bzw. an falscher Stelle installiert oder an die Automationsstation angebunden ist.
- b. Es liegt eine *fehlerhafte oder ungeeignete Programmierung* der Automation vor.
- c. In der Aktiven Funktionsbeschreibung werden den Funktionen falsche Datenpunktadressen zugewiesen, also eine *fehlerhafte Dokumentation* übergeben.
- d. Es werden aus der MSR-/GA-Anlage *unvollständige* oder *fehlerhafte Betriebsdaten* übergeben.
- e. Es liegt eine *fehlerhafte Betriebsführung* vor, wie z.B. eine fehlerhafte Parametrierung, falsche Einstellungen von Sollwerten und Zeitprogrammen oder ein unzulässiges Umschalten auf Handbetrieb durch das Betriebspersonal.
- f. Es liegt eine *fehlerhafte Spezifikation* vor. Im Zuge der Inbetriebnahme und des kontinuierlichen Betriebs werden üblicherweise Anpassungen und Optimierungen der Funktionen vorgenommen. Werden diese nicht in der Aktiven Funktionsbeschreibung dokumentiert, ergeben sich ebenfalls Abweichungen zwischen dem richtigen Istwert und dem (in diesem Fall) fehlerhaften Sollwert.

Aus Sicht des Prozesses ist bedeutsam, dass qualitätsbedingte Fehler vermeidbar sind und eindeutig und vollständig in den Leistungsumfang und Verantwortungsbereich des MSR/GA-Errichters fallen. Dadurch kann die Funktion klar als geschuldete Leistung abgrenzt und qualitätsbedingte Abweichungen als Mangel bewertet werden. Systembedingte Abweichungen hingegen sind mit vertretbaren Mitteln nicht zu vermeiden. Für diese ist eine Bemessung von maximal zu erwartenden Größenordnungen erforderlich, um Mindeststandards für die Übereinstimmung von Spezifikation und Betrieb zu definieren.

5.5 Zustandsräume ZR und Betriebszustände BZ

Wie in VDI 3814-6 dargestellt, können die Funktionen einer Anlage als Menge bzw. Abfolge von Betriebszuständen mit Hilfe von Zustandsräumen dargestellt werden. Der dort beispielhaft gezeigte Zustandsraum einer Lüftungsanlage setzt hier implizit eine zeitliche und funktionale Kontinuität voraus: die Anlage befindet sich zu jedem Zeitpunkt in einem der dargestellten Zustände und alle Übergangskriterien sind dargestellt.

Die Aktive Funktionsbeschreibung soll Zustände und Eigenschaften umfassen, die nicht nur spezifiziert, sondern auch überprüft werden können. Die Darstellungsform hängt damit sowohl von der Beschreibung als auch von den zur Prüfung verfügbaren Daten ab. Es ist in der Praxis weder praktikabel noch erforderlich, alle möglichen Zustände einer Anlage in der Planung darzustellen. Ebenso ist es nicht möglich, eine Überprüfung des Betriebs zu jedem Zeitpunkt vorzunehmen, da hierzu entsprechend zeitkontinuierliche bzw. vollständige Betriebsdaten vorliegen müssten. In Abschnitt 5.6 wird gezeigt, dass als Betriebsdaten jedoch nur diskrete Werte verfügbar sind, die keine kontinuierliche Abfolge darstellen. Sie können jedoch mit den entsprechenden Werten aus der Spezifikation zu Wertepaaren verknüpft werden.

Entsprechend wird das Konzept der Zustandsräume für die Aktive Funktionsbeschreibung wie folgt vereinfacht definiert:

- Ein durch einen *Zustandsraum* beschriebenes System befindet sich zu den definierten Zeiträumen immer in genau einem Betriebszustand.
- Dargestellt werden *diskrete Betriebszustände* ohne Abfolge oder Bezüge untereinander. Es werden keine Übergänge (Transitionen) dargestellt.
- Da es keine Übergänge gibt, gibt es *keine Darstellung von Übergangsbedingungen*.
- Zustände enthalten *Betriebsregeln*, deren Gültigkeit für die entsprechenden Betriebsdaten Ausdruck der Einhaltung einer für den Betriebszustand spezifizierten Eigenschaft^{xviii} ist.
- Weitere für Zustandsautomaten definierte Elemente wie Hierarchien, Start- und Endzustände werden nicht verwendet.

Abbildung 41 zeigt den in VDI 3814-6 dargestellte Zustandsgraph, Abbildung 42 eine unter den genannten Vorgaben vereinfachte Darstellung.

Übergänge (Transitionen), Übergangsbedingungen (Stimuli) und sonstige Merkmale können als Grafiken oder Texte zusätzlich zu Betriebszuständen und Eigenschaften spezifiziert werden. Sie sind aber nicht „aktiver“ Teil der Funktionsbeschreibung, da sie mit der hier vorgestellten Methode nicht automatisch überprüft werden können.

^{xviii} VDI 3814-6 verwendet statt *Eigenschaft* die Bezeichnung *Aktion*.

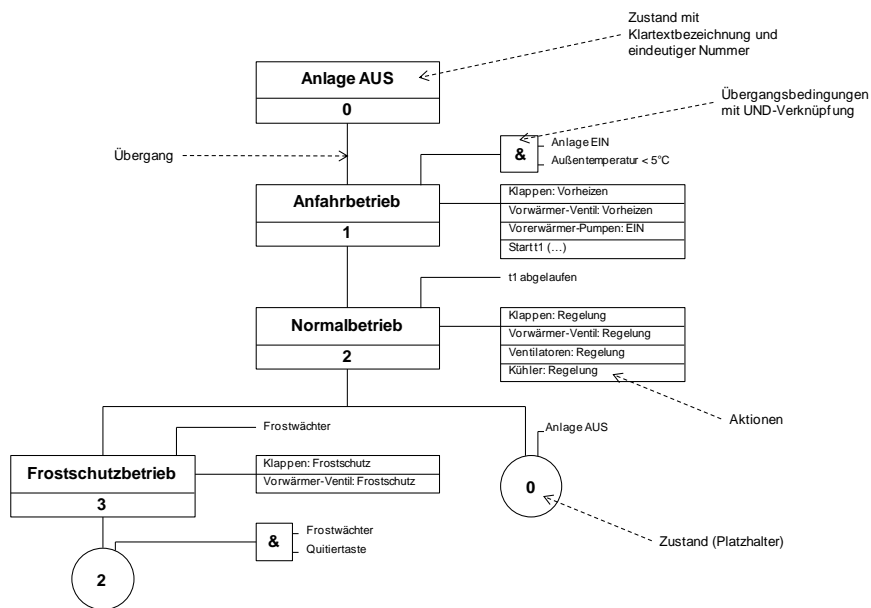


Abbildung 41 Ursprüngliche Darstellung des Zustandsgraphen²³²

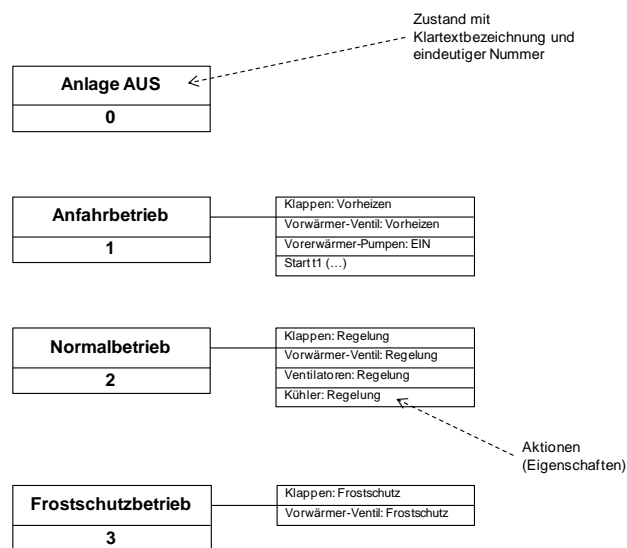


Abbildung 42 Vereinfachte Darstellung des Zustandsgraphen

5.6 Betriebsdaten

Daten der Gebäude- oder Anlagenautomation und von speziellen Messsystemen können erfasst und gespeichert werden, z.B. zu Systemtemperaturen, Ventilstellungen oder Betriebszustände von Anlagen, aber auch Energiezählerstände oder Leistungen. Momentanwerte im Abstand von 15 Minuten werden unter anderem seit Langem für die Abrechnung von elektrischen Leistungen verwendet und bilden in zahlreichen Forschungsprojekten die Datengrundlage.

Die Signale von Sensoren werden im Zuge der Datenerfassung transformiert. Analoge Messwerte der Sensorik, z.B. die Spannung (0-10 V) eines Analoggebers, sind stetige zeitkontinuierliche Signale. Zur Verarbeitung in digitalen speicherprogrammierbaren Steuerungen (SPS) werden sie zunächst mit einem Analog-Digital-Umsetzer abgetastet und in digitale Signale umgewandelt. Die Abtastung kann über Stufen erfolgen, so dass sich der digitale Wert ändert, wenn das analoge Signal sich um ein bestimmtes Maß verändert hat. Alternativ kann das analoge Signal auch taktgebunden, also in festen Zeitschritten abgetastet werden. Um Quantisierungs- und Abtastfehler zu begrenzen ist im ersten Fall die Höhe der Stufen ausreichend klein, im zweiten die Abtastfrequenz^{xix} ausreichend hoch zu wählen, um nach der Abtastung ohne Informationsverlust rekonstruiert zu werden.

Die Verarbeitung der Daten erfolgt zyklisch innerhalb der entsprechenden Programme. Diese können für eine externe Auswertung und Überwachung des Anlagenbetriebs mit den gleichen Verfahren auch dauerhaft gespeichert werden. Auf Grund des notwendigen Speicherplatzes erfolgt dies in der Regel jedoch in größeren Zeitschritten. Üblich sind im Monitoring von Gebäuden Zeitschritte zwischen 1 und 60 Minuten. Mit dieser niedrigen Abtastfrequenz liegt im Ergebnis keine Transformation des Ursprungssignals mehr vor. Vielmehr werden zu den einzelnen Zeitpunkten jeweils diskrete Momentanwerte gespeichert.

Abbildung 43 zeigt schematisch die Transformation vom analogen Signal $f_1(t)$ über das analog-digital gewandelte $f_2(t)$ zum extern gespeicherten Momentanwert $f_3(t)$.

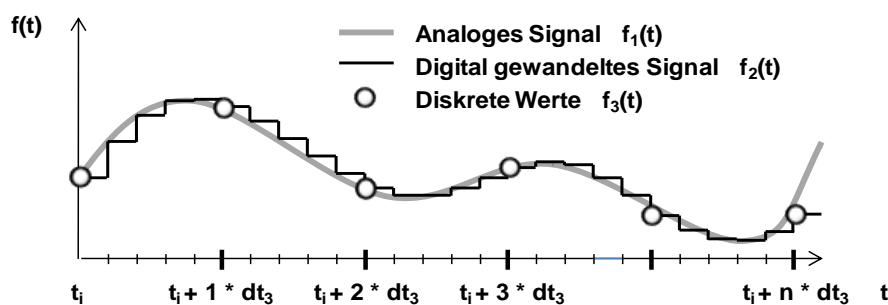


Abbildung 43 Datentransformation von der Gebäudeautomation zum Monitoring

Speicherung und Export von Betriebsdaten für alle Datenpunkte und die Übergabe an externe Stellen sind Standardfunktionen der Gebäudeautomation. Entsprechend können sie zur Überprüfung z.B. bei Abnahmen oder zur Überwachung im Betrieb genutzt werden.

5.7 Auswertung von Zustandsräumen

Zur Auswertung eines Zustandsraums zu einem Zeitpunkt wird der gültige Betriebszustand für diesen Zeitpunkt evaluiert. Der Zustandsraum ist gültig, wenn alle Betriebsregeln des Betriebszustands, in dem sich die Anlage befindet, für die entsprechenden Betriebsdaten gültig sind. Ein Zustandsraum ist auch dann gültig, wenn für den gültigen Betriebszustand keine Betriebsregel definiert ist.

^{xix} Für die Rekonstruktion eines stetigen Ursprungssignals ohne Informationsverlust ist nach dem Nyquist-Shannon-Abtasttheorem eine gleichmäßige Abtastung mit der zweifachen Frequenz des Ursprungssignals notwendig. In einem Regelkreis erfolgt in diesem Kontext jedoch keine Abtastung von Signalen mit dem Ziel einer Rekonstruktion, sondern lediglich die Verarbeitung des Signalwerts zur Berechnung einer Regelabweichung zu bestimmten Zeitpunkten.

Da sich das in dem Zustandsraum abgebildete System zu jedem betrachteten Zeitpunkt in genau einem Zustand befindet, ist bei Gültigkeit des vorliegenden Zustands auch der Zustandsraum zu diesem Zeitpunkt gültig^{xx}.

Alternative Varianten der Auswertungslogik sind grundsätzlich möglich. So kann auch definiert werden, dass in einem Zustandsraum zwei Zustände gleichzeitig gültig sind. Entsprechende Möglichkeiten wurden im Zuge des Forschungsprojekts Energie-Navigator untersucht²³³.

5.8 Zustandsmerker

Offen ist bei der Evaluierung des Zustandsraums die Frage, in welchem Zustand sich ein System zu einem bestimmten Zeitpunkt befindet. Da keine Transitionen definiert sind und, selbst wenn dies der Fall wäre, nicht alle Daten aus der Gebäudeautomation vorliegen, um den aktuell vorliegenden Zustand zu bestimmen, muss diese Information zusätzlich übergeben werden.

Als einzige zusätzliche Leistung bei der Anwendung dieser Methodik muss das Gebäudeautomationssystem deshalb für jeden Zustandsraum einen sogenannten *Zustandsmerker*^{xxi} als virtuellen Datenpunkt definieren. Der Zustandsmerker gibt an, in welchem Zustand sich eine Anlage zum einem bestimmten Zeitpunkt befindet. Die Überprüfung erfolgt dann für die Betriebsregeln des entsprechenden Betriebszustands.

Liegt in einem bestehenden System kein Merker vor, kann dieser auch durch einen anderen zuverlässigen Indikator gebildet werden, z.B. den Stromverbrauch eines Ventilators als Indikator für den Betriebszustand (AN/AUS) einer Lüftungsanlage. Da die für die Nachweisführung in dieser Arbeit verwendeten Anlagen und Funktionen noch nicht mit Aktiven Funktionsbeschreibungen umgesetzt wurden, wurden die fehlenden Merker über solche Indikatoren gebildet.

5.9 Betriebsgüte

Die Gültigkeit eines Zustandsraumes bezieht sich jeweils auf einen einzelnen Zeitpunkt. Die Betriebsgüte dient der Bewertung der Zustandsräume über der Zeit. Die *Betriebsgüte BG* ist ein Maß für den Anteil der einzelnen Zeitpunkte innerhalb einer Zeitspanne, für die ein Zustandsraum ZR gültig ist, und damit für die Übereinstimmung zwischen Planung und Betrieb innerhalb einer Zeitspanne.

Grundlage der Bewertung ist die Menge der Booleschen Werte ZR_T für alle Zeitpunkte $t_1 \dots t_n$ innerhalb der Zeitspanne T, siehe Gleichung 3.

Gleichung 3 $ZR_T = \{ZR_{t1}, ZR_{t2}, ZR_{t3} \dots ZR_{tn}\}$

mit

ZR_T Menge der Booleschen Werte in der betrachteten Zeitspanne zu den Zeitpunkten t

t_n Zeitpunkte innerhalb der betrachteten Zeitspanne

^{xx} Gültig ist im engeren Sinne die im Demonstrator automatisch angelegte Regel zur Auswertung des Zustandsraums. Im Weiteren wird von der „Gültigkeit des Zustandsraums“ gesprochen.

^{xxi} Auch der Begriff des Zustandsmerkers ist aus der Regelungstechnik abgeleitet, meint hier jedoch nicht den *Merker* als Operand eines Funktionsplans.

Wie bei der Betriebsabweichung wird auch für die Betriebsgüte BG ein Grenzwert-Konzept zur Bewertung eingeführt. Als Bewertungsmaß wird die relative Häufigkeit $h_n(ZR_T)$ der Zeitpunkte innerhalb der Zeitspanne verwendet, für die der Boolesche Wert TRUE vorliegt, Gleichung 4.

Gleichung 4
$$h_n(ZR_T) = \frac{H_n(ZR_T)}{n}$$

mit

$h_n(ZR_T)$ Relative Häufigkeit gültiger Zustandsräume im Zeitraum

$H_n(ZR_T)$ Absolute Häufigkeit gültiger Zustandsräume im Zeitraum

n Anzahl der Elemente der Menge (ZR_T)

Die Betriebsgüte BG_T für eine Zeitspanne T wird entsprechend nach Gleichung 5 definiert.

Gleichung 5
$$BG_T = h_n(ZR_T) \times 100 [\%]$$

mit

$h_n(ZR_T)$ Relative Häufigkeit gültiger Zustandsräume im Zeitraum

BG_T Betriebsgüte im Zeitraum T

Die Einheit der Betriebsgüte ist %.

Für die Betriebsgüte eines Zustandsraums kann eine Mindestanforderung bzw. ein unterer Grenzwert definiert werden. Damit ist eine Anforderung an die Übereinstimmung des Betriebs mit der Planung eindeutig beschreiben und prüfbar. Abbildung 44 zeigt das gesamte Auswertungskonzept für Zustandsräume und die Betriebsgüte.

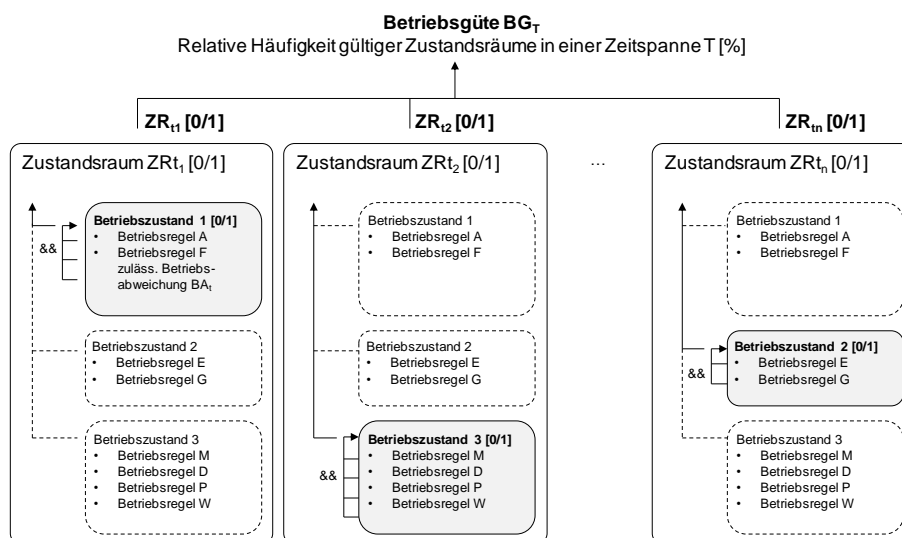


Abbildung 44 Prinzip des Vergleichs und der Bewertung von Spezifikation (SOLL) und Betrieb (IST)

Zu beachten ist, dass lediglich bei der Bewertung der einzelnen Eigenschaften deren physikalische Einheit in der Betriebsabweichung berücksichtigt wird. Für die weitere Auswertung werden lediglich Boolesche Werte verwendet.

In den folgenden Abschnitten wird gezeigt, dass und wie die beschriebene Methodik der Aktiven Funktionsbeschreibung auf verschiedenen typische gebäudetechnische Anlagen und Funktionen angewendet werden kann.

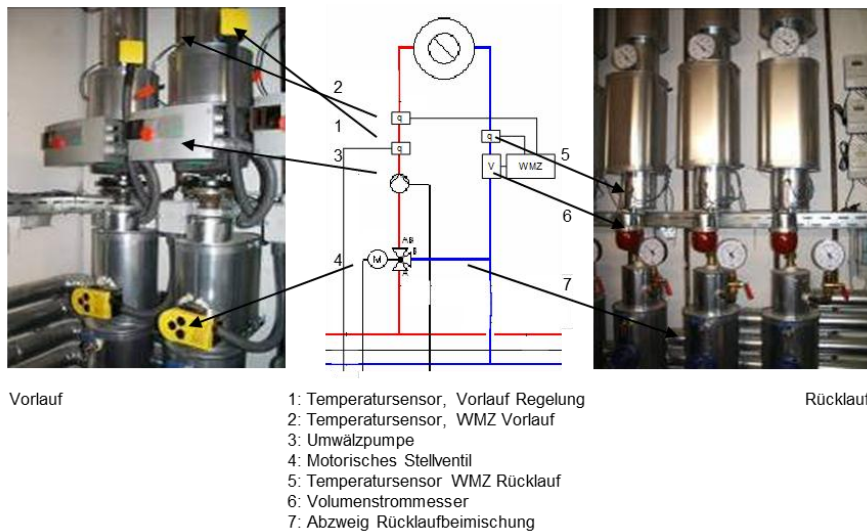


Abbildung 46 Schema eines statischen Heizkreises und Installation von Vorlauf und Rücklauf²³⁶

Im Folgenden wird der Heizkreis Ost des Neuen Regionshauses Hannover als Referenzanlage verwendet.

6.1.2 Betriebsdaten

Die verwendeten Betriebsdaten für die Anlage wurden im Forschungsprojekt Neues Regionshaus Hannover²³⁷ des IGS erfasst. Die Daten wurden zunächst in der Automationsstation (Fabrikat Sauter) als Momentanwerte im Abstand von 15 Minuten gespeichert und von dort an die übergeordnete Gebäudeleitebene (Fabrikat Honeywell) übergeben. Diese exportierte die Daten im Dateiformat csv in wöchentlichen Dateien. Die Daten wurden anschließend mit der Energiemanagement-Software ennovatis Controlling²³⁸ eingelesen, gespeichert, für die Analysen in dieser Arbeit exportiert und in den Demonstrator des Energie-Navigators importiert. Auch hier wurde mit einem Zeitschritt von 15 Minuten gearbeitet.

6.1.3 Betrieb der Umwälzpumpe

Der Heizkreis Ost verfügt über eine Umwälzpumpe. Soll Wärme im Heizkreis verteilt werden, muss die Pumpe in Betrieb sein und einen Massenstrom erzeugen. Mit Blick auf die Energieeffizienz ist in gleiche Weise die Vorgabe bedeutsam, dass die Pumpe abgeschaltet sein soll, wenn kein Wärmebedarf besteht. Im Folgenden wird eine Aktive Funktionsbeschreibung für den Betrieb der Pumpe untersucht.

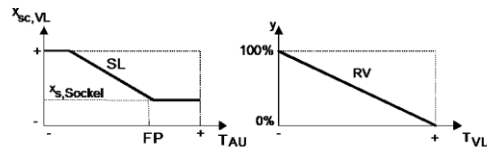
6.1.3.1 Analyse der konventionellen Funktionsbeschreibung

Die konventionelle Funktionsbeschreibung zum Regionshaus beschreibt die Heizungsanlagen in drei thematischen Abschnitten. Zunächst wird die gesamte Anlage in dem oben dargestellten grafischen Schema mit den wichtigsten Bauteilen, insbesondere Leitungsnetz, Pumpen und Ventilen dargestellt, siehe Abbildung 45. Die Grafik ist angelehnt an die Vorgaben der VDI 3814. Für Vorlauftemperatur und Ventilstellungen sind unser dem Anlagenschema nicht parametrisierte Sequenzbilder dargestellt.

Anschließend werden die Funktionen textlich erläutert. Dabei wird der Aufbau der Anlagen nochmals beschrieben und um die Beschreibung von Funktionen ergänzt, Abbildung 47.

Teil A

- 1 Heizungsgruppen statische Heizung
Die Gebäudeseiten des Neubaus (Nord, Süd, West, Ost) und der Multifunktionsraum stellen je einen eigenen Regelkreis dar. Die Regelung erfolgt witterungsgeführt, jeweils über ein Dreiwegmischventil und eine Gruppenpumpe. Die Temperaturen im Auslegungsfall betragen 70°C Vorlauftemperatur und 55°C Rücklauftemperatur.
- 5 Die Heizkurven können über die Sollwertparameter Sockeltemperatur (bei 20°C AU-Temperatur) und Steilheit eingestellt werden.



- Des Weiteren werden die Heizgruppen über Aussentemperaturgrenzwerte freigegeben. Werden die Grenzwerte (einstellbar für Tag und Nachtbetrieb) unterschritten, so wird die Regelung freigegeben und es wird automatisch der jeweilige Kreis der **Betonkernaktivierung gesperrt**.
- 10 Alle Gruppen erhalten eine Nachtabsenkung und eine Wochenendabsenkung über ein Zeitprogramm. Die Schaltzeiten und die Heizprogramme mit den zugehörigen Parametern können auf der GLT-Ebene vom Betriebspersonal verändert werden. Für die statischen Heizgruppen wird je eine eigene Heizkurve hinterlegt. Die Regelung der Heizkreise erfolgt in Abhängigkeit von der Außentemperatur.
- 15 Dem entsprechend wird die Vorlauftemperatur jedes einzelnen Heizkreises geregelt. Der Wärmebedarf der einzelnen Gruppen ist dem Strangschemata zu entnehmen.

Abbildung 47 Auszüge aus der textlichen Beschreibung der Heizkreise in der Funktionsbeschreibung des Neuen Regionshauses Hannover (Büro HSK, Quelle: Region Hannover)²³⁹

In den Zeilen 1-10 wird der Aufbau der Heizungsanlage und die Regelungsart beschrieben, die aus fünf Heizkreisen besteht, für die gleichartige Spezifikationen vorgesehen werden.

Im nächsten Abschnitt (11-16) wird die Funktion des Zeitprogramms für Tag und Nacht, nun bezeichnet als Nachtabsenkung, wiederholt und um die Wochenendabsenkung ergänzt.

Die Funktionsbeschreibung enthält außerdem eine tabellarische Darstellung verschiedener Parameter mit initial eingestellten Sollwerten (Teil B: Parametrierung) und eine nicht parametrisierte Vorlage für ein Zeitprogramm für Normal- und Absenkbetrieb der Vorlauftemperatur (Teil: Parametrisierung), siehe Abbildung 48.

Teil B

Beschreibung	Eingestellte Werte	Änderung	Änderung
Grenzwert Aussentemp. (Tag- / Nutzungsbetrieb)	22,0 °C		
Grenzwert Aussentemp. (Nacht- / Absenkbetrieb)	18,0 °C		
HK VL-Sockeltemperatur bei 20° Aussentemp.	25,0 °C		
HK Begrenzung VL-Temperatur	80,0 °C		
HK Nachtabsenkung VL-Temperatur	15,0 °C		
HK Steilheit	1,7		

Teil C

Zeitschaltprogramm(EY3600 - Unterstation):

	Mo.	Die.	Mi.	Do.	Fr.	Sa.	So.
Einsch:	--:--	--:--	--:--	--:--	--:--	--:--	--:--
Aussch:	--:--	--:--	--:--	--:--	--:--	--:--	--:--

Abbildung 48 Parametrierung und Parametrisierung²⁴⁰

Im Bezug auf die Umwälzpumpe definiert die Funktionsbeschreibung, dass die Pumpe in Abhängigkeit von Außenlufttemperaturgrenzwerten für Tag und Nachtbetrieb freigegeben wird, also unter diesen Bedingungen entsprechend ihrer eigenen Regelung läuft (Abbildung 47, 8-10). Die

Grenzwerte sind mit 22,0°C und 18,0°C parametrisiert (Abbildung 48). Tag- und Nachtbetriebszeiten werden nicht definiert.

6.1.3.2 Spezifikation des Zustandsraums

In diesem Abschnitt wird gezeigt, dass in der konventionellen Funktionsbeschreibung dargestellte Spezifikationen für den Betrieb der Umwälzpumpe mit den Mitteln der Aktiven Funktionsbeschreibung spezifiziert werden können. Es werden drei Betriebszustände BZ definiert:

BZ0 / AUS (der Heizkreis bzw. die Pumpe ist abgeschaltet)

BZ1 / Normalbetrieb (Werktags tagsüber) und

BZ2 / Absenkbetrieb (nachts und an Wochenenden).

Die Differenzierung in Normal- und Absenkbetrieb ist nicht zwingend erforderlich, wird aber vorgenommen, da die Betriebszustände später auch für andere Eigenschaften genutzt werden. Die in den Zeilen 17-19 beschriebenen Funktion des täglichen Pumpenlaufs von 30 Sekunden als Blockierschutz wird nicht als eigener Betriebszustand spezifiziert. Er ist nur für sehr kurze Betriebszeiten gültig und kann für den hier angestrebten Nachweis vernachlässigt werden.

Zur Definition des Zustandsmerkers muss wie unter Abschnitt 5.8 beschrieben ein Indikator gebildet werden. In diesem Fall werden die Zeit und der Istwert der Außenlufttemperatur verwendet. Die Definition des Indikators erfolgt im Demonstrator des Energie-Navigators. Die Spezifikation des Zeitprogramms *Normalbetrieb* ist in Abbildung 49 dargestellt.

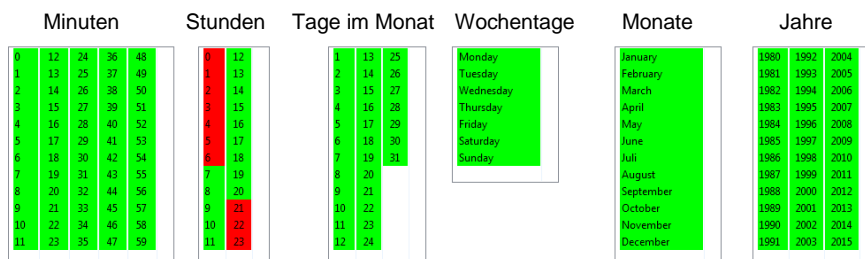


Abbildung 49 Zeitprogramm *Normalbetrieb* für die Betriebsweise des Heizkreises (grün=gültig)^{xxii}

Das Zeitprogramm ZP ist mit Ausnahme der Zeit von 21 Uhr bis 7 Uhr immer gültig.

^{xxii} Entgegen der konventionellen Funktionsbeschreibung war in den später verwendeten Betriebsdaten an den Wochenenden kein Absenkbetrieb erfolgt. Die Wochenendabsenkung wird deshalb im Weiteren nicht als Betriebsvorgabe definiert.

Der Zustandsmerker wird wie folgt gebildet:

BZ0 liegt vor, wenn weder Zustand 1 noch Zustand 2 vorliegt.

BZ1 liegt vor, wenn das Zeitprogramm ZP gültig ist und die Außenlufttemperatur unter dem Grenzwert für den Tag liegt, also $T_{amb} < 18^{\circ}\text{C}$ ist.

BZ2 liegt vor, wenn Zeitprogramm ZP ungültig ist und die Außenlufttemperatur unter dem Grenzwert für die Nacht liegt, also $T_{amb} < 14^{\circ}\text{C}$ ist.

Im nächsten Schritt wird nun die Betriebsregel für die Umwälzpumpe definiert. Die Spezifikation enthält keine eindeutige Vorgabe für den Betrieb der Pumpe in den Betriebszuständen Normal- und Absenkbetrieb. Sie kann in diesen Zuständen sowohl eingeschaltet, als auch, auf Grund geringen Wärmebedarfs, ausgeschaltet sein. Es kann jedoch eine Vorgabe für die Zeiten gemacht werden, in denen keine Freigabe vorliegt: dann muss die Pumpe abgeschaltet sein.

Diese Eigenschaft *Pumpe* wird entsprechend in den verschiedenen Betriebszuständen spezifiziert^{xxiii}. Da in den Betriebsdaten jedoch keine Betriebsmeldung der Umwälzpumpe vorliegt, wird der Volumenstrom \dot{V} des installierten Wärmemengenzählers als Indikator für den Betrieb der Pumpe entsprechend Gleichung 6 verwendet.

Gleichung 6 IF $\dot{m} = 0$ THEN *Pumpe* = AUS ELSE *Pumpe* = EIN .

Mit der Betriebsregel für die Pumpe und den Betriebszuständen wird ein Zustandsraum entsprechend Tabelle 9 definiert.

Tabelle 6 Betriebszustände und Parametrisierung der Eigenschaften in der Aktiven Funktionsbeschreibung

	BZ0 / AUS	BZ1 / Normalbetrieb	BZ2 / Absenkbetrieb
Zustandsmerker	!BZ1 && !BZ2	ZP && $T_{amb} < 18^{\circ}\text{C}$!ZP && $T_{amb} < 14^{\circ}\text{C}$
Pumpe	$\dot{V} = 0$	Keine Spezifikation	Keine Spezifikation

Da keine Betriebsregel für Normal- und Absenkbetrieb definiert, wird der Zustandsraum für die entsprechenden Zeitpunkte als gültig ausgewertet. Bei einer Zusammenfassung der beiden Zustände würde das gleiche Ergebnis vorliegen.

6.1.3.3 Auswertung des Zustandsraums

Für die folgenden Analysen werden Datensätze des Jahres 2009 mit jeweils 35.040 Einzelwerten je Datenpunkt verwendet. Abbildung 50 zeigt den Zustandsmerker und die Auswertung der Betriebsregel für die Betriebsdaten.

^{xxiii} Die Pumpe wird lt. Funktionsbeschreibung auch in Abhängigkeit von der Ventilstellung ein- und ausgeschaltet. Dies wird hier nicht berücksichtigt, da die Eigenschaft nur für den Zustand AUS definiert wird und dieser so korrekt abgebildet wird.

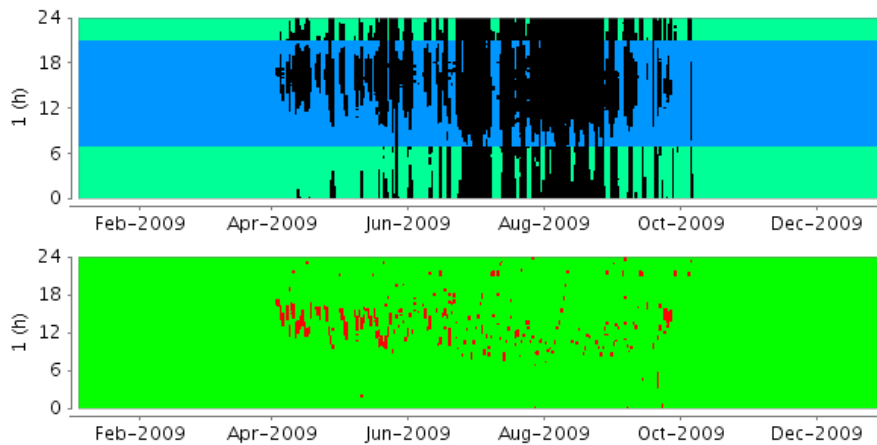


Abbildung 50 Viertelstündliche Betriebszustände für den Heizkreis in einem Jahr
(schwarz: BZ0/Aus, blau: BZ1/Normalbetrieb, grün: BZ2/Absenkbetrieb)
Betriebsregel BR_i (grün=gültig; rot=ungültig)

Da nur für den Zustand BZ0/AUS eine Betriebsregel definiert ist, können auch nur hier Fehler erkannt werden. Entsprechend treten Fehler nur in den Sommermonaten auf, wenn der Heizkreis auf Grund der hohen Außenlufttemperaturen zeitweise abgeschaltet sein soll.

Ursachen für Fehler können zum einen Transitionen, also die Zeiten kurz vor und kurz nach dem Abschalten der Heizkreises sein. Hier kann es zu geringfügigen zeitlichen Verschiebungen zwischen der Messung der Außenlufttemperatur und der Messung des Massenstroms im Heizkreis kommen. Außerdem kann der regelmäßige Pumpenlauf (Blockierschutz), der laut Funktionsbeschreibung einmal am Tag die Pumpe für 30 Sekunden in Betrieb nimmt, um eine Festsetzen bei langen Stillstandszeiten zu vermeiden, zu Fehlern führen. Der Blockierschutz wurde nicht spezifiziert. Beide Fehlerarten sind systembedingt, da ihre Vermeidung entweder die Anforderungen an die Synchronisation der Messung und Datenverarbeitung oder den Umfang der Spezifikation in der Aktiven Funktionsbeschreibung in unangemessenem Maße erhöhen würde, da hier für den Blockierschutz ein zusätzlicher Betriebszustand definiert oder ein zusätzlicher Datenpunkt übergeben werden müsste.

Die Auswertung des gesamten Zustandsraums entspricht der Auswertung des jeweils gültigen Betriebszustands.

Für die Zustände 1 und 2 ist der Zustandsraum immer gültig, da für sie keine Betriebsregel spezifiziert wurde.

Die oben dargestellte Eigenschaft ist in der Planung spezifiziert, im Betrieb messtechnisch erfasst und auf Übereinstimmung mit der Spezifikation überprüft worden. Nun werden die Ergebnisse der Auswertung des Zustandsraums in verschiedenen Zeitspannen aggregiert, um eine für die Praxis geeignete Bewertung des Betriebs zu ermöglichen.

Grundlage der Bewertung sind die Menge der Booleschen Werte ZR_T für alle Zeitpunkte $t_1 \dots t_n$ innerhalb der zu bewertenden Zeitspanne, siehe Gleichung 3.

Als für die Anwendungspraxis geeignet werden die Zeitspannen Tag, Kalenderwoche, Monat, (Jahres-)Quartal und Jahr betrachtet. Zunächst wird die relative Häufigkeit der als gültig bewerteten Zustandsräume für jede Zeitspanne berechnet. In Gleichung 7 wird dies beispielhaft für einen Tag, den 29.05.2009, berechnet, an dem der Zustandsraum an 93 von 96 Zeitpunkten gültig war.

Gleichung 7 $h_n(A) = \frac{H_n(A)}{n} = \frac{93}{96} = 0,97$

Mit

$h_n(A)$ Relative Häufigkeit des Merkmals A ($ZR_t = \text{TRUE}$) .

A Merkmal

$H_n(A)$ Absolute Häufigkeit

n Anzahl der Elemente der Menge ZR_T

Dies ergibt für diesen Tag eine Betriebsgüte für den Zustandsraum von 97%, siehe Gleichung 8.

Gleichung 8 $BG_{day} = h_n(A)_T \times 100 = 97 \% .$

Mit entsprechender Berechnung sind die Werte für die Betriebsgüte in Abbildung 51 für die verschiedenen Zeitspannen im Jahre 2009 dargestellt. In grau sind dazu die Werte für die Betriebsgüte chronologisch angegeben. Die rote Linie zeigt die gleichen Werte, jedoch ihrer Größe nach absteigend sortiert.

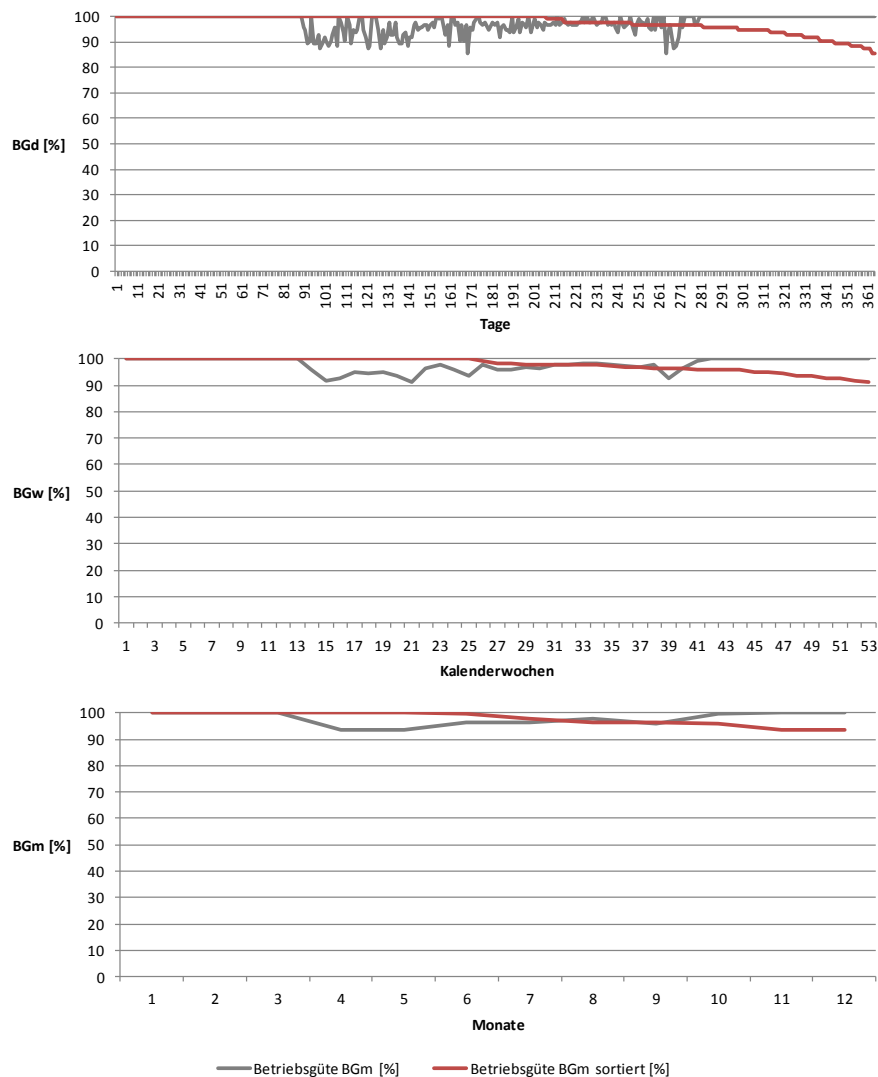


Abbildung 51 Betriebsgüten BG_{day} , BG_{week} , BG_{month} für das Jahr 2009, chronologisch und sortiert

In Tabelle 7 sind ergänzend die Werte für Vierteljahre und das gesamte Jahr 2009 dargestellt.

Tabelle 7 Betriebsgüte für die Vierteljahre (Q1-4) und das gesamte Jahr 2009

	Q1	Q2	Q3	Q4	2009
$BG_{quarter} : BG_{year}$	100%	95%	97%	100%	98%

Da die identifizierten Abweichungen zwischen Spezifikation und Betrieb nicht qualitätsbedingt sind, ist davon auszugehen, dass höhere Werte mit den bestehenden Systemen und Spezifikationen auf Grund der oben genannten systembedingten Ursachen nicht erreicht werden können. Die niedrigsten hier erreichten Werte können entsprechend als Mindestanforderung an die Betriebsgüte definiert werden, siehe Tabelle 8.

Tabelle 8 Grenzwerte für die Betriebsgüte des Zustandsraums

Betriebsgüte für Zeitspannen	Grenzwert
BG_{day} (Pumpe)	85%
BG_{week} (Pumpe)	91%
BG_{month} (Pumpe)	94%
$BG_{quarter}$ (Pumpe)	95%
BG_{year} (Pumpe)	98%

Nach entsprechender Validierung für eine repräsentative Anzahl von Systemen können diese Grenzwerte allgemein als Mindestanforderungen an diese Funktion von Automationsanlagen spezifiziert werden.

Die Analyse zeigt, dass für einen statischen Heizkreis mit der Aktiven Funktionsbeschreibung sowohl eine Spezifikation des Betriebs der Umwälzpumpe als auch eine Bewertung der Übereinstimmung von Spezifikation und Betrieb möglich ist. Mit dem Grenzwert für die Betriebsgüte konnte also eine Mindestanforderung an die Betriebsqualität der Umwälzpumpe definiert werden.

6.1.4 Witterungsgeführte Vorlauftemperatur

Die Heizkreise im Neuen Regionshaus Hannover sind mit einer witterungsgeführten Regelung der Vorlauftemperatur ausgeführt. In Heizkreisen mit Rücklaufbeimischung kann die Vorlauftemperatur variabel zwischen der Vorlauftemperatur im Verteiler und der Rücklauftemperatur aus dem Heizkreis geregelt werden. Die Kennlinie, die die Regelgröße *Vorlauftemperatur* als Funktion der Außenlufttemperatur „witterungsgeführt“ abbildet, wird üblicherweise mit einer Sockeltemperatur, einer linearen oder gekrümmten Steigung und einer maximalen Temperatur dargestellt. Der Regelkreis wirkt durch Vergleich von Soll- und Istwert der Vorlauftemperatur auf das Beimischventil, siehe auch Abbildung 46, Abschnitt 6.1.1.

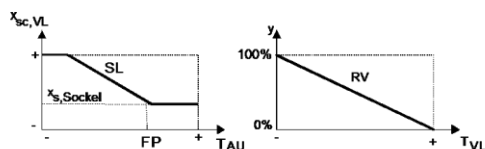
Die witterungsabhängige Führung kann ergänzt werden durch eine zeitgesteuerte Absenkung der Vorlauftemperatur z.B. nachts und an Wochenenden, wenn geringere Raumtemperaturen zulässig und entsprechend niedrigere Heizleistungen erforderlich sind. Außerdem kann die Heizungsanlage bei höheren Außenlufttemperaturen vollständig abgeschaltet werden.

6.1.4.1 Analyse der konventionellen Funktionsbeschreibung

Die konventionelle Funktionsbeschreibung ist bereits in Abschnitt 6.1.3.1 vorgestellt worden. Teil A, in dem die Regelung der Vorlauftemperatur ausführlich beschrieben ist, wird hier nur zur besseren Lesbarkeit noch einmal dargestellt, siehe Abbildung 52.

Teil A

- 1 Heizungsgruppen statische Heizung
Die Gebäudeseiten des Neubaus (Nord, Süd, West, Ost) und der Multifunktionsraum stellen je einen eigenen Regelkreis dar. Die Regelung erfolgt witterungsgeführt, jeweils über ein Dreiwegemischventil und eine Gruppenpumpe. Die Temperaturen im Auslegungsfall betragen 70°C Vorlauftemperatur und 55°C Rücklauftemperatur.
- 5 Die Heizkurven können über die Sollwertparameter Sockeltemperatur (bei 20°C AU-Temperatur) und Steilheit eingestellt werden.



- Des Weiteren werden die Heizgruppen über Aussentemperaturgrenzwerte freigegeben. Werden die Grenzwerte (einstellbar für Tag und Nachtbetrieb) unterschritten, so wird die Regelung freigegeben und es wird automatisch der jeweilige Kreis der **Betontkernaktivierung gesperrt**.
- 10 Alle Gruppen erhalten eine Nachtabsenkung und eine Wochenendabsenkung über ein Zeitprogramm. Die Schaltzeiten und die Heizprogramme mit den zugehörigen Parametern können auf der GLT-Ebene vom Betriebspersonal verändert werden. Für die statischen Heizgruppen wird je eine eigene Heizkurve hinterlegt. Die Regelung der Heizkreise erfolgt in Abhängigkeit von der Außentemperatur.
 - 15 Dem entsprechend wird die Vorlauftemperatur jedes einzelnen Heizkreises geregelt. Der Wärmebedarf der einzelnen Gruppen ist dem Strangschemata zu entnehmen.

Abbildung 52 Auszüge aus der textlichen Beschreibung der Heizkreise in der Funktionsbeschreibung des Neuen Regionshauses Hannover (Büro HSK, Quelle: Region Hannover)²⁴¹

In den Zeilen 1-5 wird die Regelungsart der Heizkreise beschrieben, jedoch ohne eindeutige Spezifikation von Regelgrößen (gemeint sind Außenlufttemperatur und Vorlauftemperatur).

Obwohl die Anwendung von Heizkurven erst weiter unten beschrieben wird, ist in den Zeilen 6-7 bereits dargestellt, dass und wie sie einstellbar sind. Dies ist ein Hinweis auf die umgebenden organisatorischen Prozesse, in diesem Fall die Bedienung der Anlage durch das Betriebspersonal. Sockeltemperatur und Steilheit werden als Parameter eingeführt (Para-

metrisierung), der Hinweis auf die Sockeltemperatur ist dabei eine erste Parametrierung, also die Zuweisung eines Wertes zu diesem Parameter.

Die linke Grafik stellt eine Kennlinie dar, die die Vorlauftemperatur ($X_{SC,VL}$) als Funktion der Außenlufttemperatur T_{AU} zeigt. Dabei werden verschiedene Bezeichnungen zur Parametrisierung verwendet, die jedoch nicht im Anlagenkontext erläutert und auch nicht parametrierbar werden.

Die rechte Grafik deutet den Zusammenhang zwischen Vorlauftemperatur und Ventilstellung an. Als Vorgabe für die Funktion des Regelkreises ist sie jedoch unpräzise, da die Ventilstellung über die Regelabweichung, die Differenz zwischen Soll- und Istwert der Vorlauftemperatur im Regelkreis, bestimmt wird. Auch erfolgt keine umfassende Parametrierung.

Die Kennlinienfunktion wird dann um die Freigabe der Heizgruppen ergänzt (Zeilen 8-10). Dabei wird indirekt ein Zeitprogramm eingeführt und dieses, wenn auch unpräzise, parametrierbar (Tag und Nacht).

Im nächsten Abschnitt wird die Funktion des Zeitprogramms für Tag und Nacht, nun bezeichnet als Nachtabenkung, wiederholt und um die Wochenendabsenkung ergänzt. Während der Hinweis auf die Möglichkeit zur Parametrierung auf der GLT-Ebene wiederum die Prozess- bzw. Anwendungsebene betrifft, bezieht sich der Hinweis auf die individuellen Heizkurven auf die Parametrierung (Zeilen 11-14).

Zum dritten Mal wird dann nochmals die Art der Regelung beschrieben (Zeilen 14-16).

Wie in Abschnitt 6.1.3.1 erwähnt, werden Grenzwerte der Außenlufttemperatur für die Freigabe der Heizkreise in Tag- und Nachtbetrieb spezifiziert. Die Funktion der entsprechenden Zeitprogramme wird erwähnt, aber nicht parametrierbar.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die intendierte Funktion der Heizungsanlage (mehrfach) beschrieben wird. Parametrisierung und Parametrierung erfolgen jedoch nur teilweise und ohne präzisen Bezug zu Anlagen und Funktionen. Eine Dokumentation der Adressierung, also der verwendeten Datenpunkte in der umgesetzten Anlage, erfolgt nicht.

6.1.4.2 Spezifikation des Zustandsraums

In diesem Abschnitt wird gezeigt, dass die in der konventionellen Funktionsbeschreibung dargestellten Spezifikationen für die witterungsgeführte Vorlauftemperatur mit den Mitteln der Aktiven Funktionsbeschreibung spezifiziert werden können. Einige Spezifikationen wurden auf Grund der Betriebsdaten angepasst, da die konventionelle Funktionsbeschreibung offensichtlich nicht präzise umgesetzt wurde.

Die Aktive Funktionsbeschreibung verwendet die gleichen Betriebszustände und den gleichen Zustandsmerker wie die Spezifikation der Umwälzpumpe in Abschnitt 6.1.3.1.

Für die Eigenschaft *Vorlauftemperatur* werden zwei unterschiedliche Kennlinien für den Tag- (C_{normal}) und den Nachtbetrieb (C_{absenk}) definiert. Dabei werden die Stützpunkte entsprechend Abbildung 53 verwendet. Die obere Grenze für die Vorlauftemperatur wird entsprechend Abbildung 48 mit $\vartheta_{VL} = 80^{\circ}\text{C}$ angenommen.

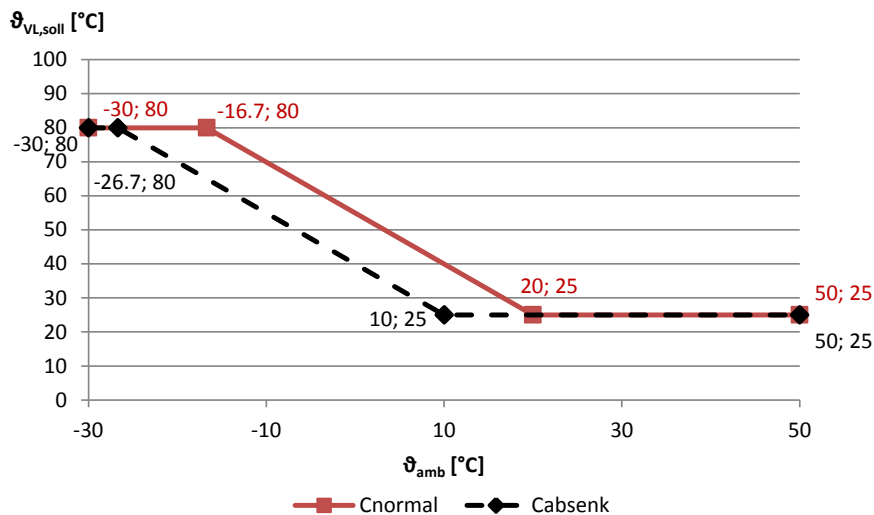


Abbildung 53 Stützpunkte der Kennlinien

Die spezifizierte Vorlauftemperatur kann im Betrieb nicht exakt erreicht werden. Entsprechende Betriebsregeln müssen daher unter Verwendung einer zulässigen Betriebsabweichung nach Gleichung 9 spezifiziert werden.

Gleichung 9
$$BA_{\theta_{VL},t} = \begin{cases} \text{Normalbetrieb: } \theta_{VL,ist,t} - \theta_{VL,Cnormal,t} \\ \text{Absenkbetrieb: } \theta_{VL,ist,t} - \theta_{VL,Cabsenk,t} \end{cases}$$

Die Betriebsregeln sind gültig, wenn die Grenzwerte für die Betriebsabweichung eingehalten werden, siehe Gleichung 10.

Gleichung 10
$$BA_{lim,bot} < BA_{\theta_{VL},t} < BA_{lim,top}$$

Entsprechend wird ein Zustandsraum für die Eigenschaft *Vorlauftemperatur* nach Tabelle 9 spezifiziert.

Tabelle 9 Betriebszustände und Parametrisierung der Eigenschaften in der Aktiven Funktionsbeschreibung

	BZ0 / AUS	BZ1 / Normalbetrieb	BZ2 / Absenkbetrieb
Zustandsmerker	!BZ1 && !BZ2	ZP && $\theta_{amb} < 18^{\circ}\text{C}$!ZP && $\theta_{amb} < 14^{\circ}\text{C}$
Vorlauftemperatur θ_{VL}	Keine Spezifikation	$BA_{lim,bot} < BA_{\theta_{VL}} < BA_{lim,top}$	$BA_{lim,bot} < BA_{\theta_{VL}} < BA_{lim,top}$

In einer späteren Anwendung würden für die Grenzwerte der Betriebsabweichung geeignete Werte verwendet. Diese werden erst im folgenden Abschnitt ermittelt, so dass hier nur die Parameter dargestellt sind. Damit ist die Funktion der zeit- und witterungsgeführten Vorlauftemperatur mit einer Aktiven Funktionsbeschreibung spezifiziert.

6.1.4.3 Auswertung des Zustandsraums

Im nächsten Schritt wird dargestellt, dass mit der Spezifikation auch eine Bewertung der Betriebsdaten möglich ist. Da die Vorlauftemperatur eine über die Anlagensensorik gemessene Größe ist, werden für sie entsprechend Abschnitt 5.3 zunächst die Betriebsabweichung analysiert und ge-

eignete Grenzwerte definiert. Diese werden dann in Betriebsregeln verwendet. Anschließend werden die Betriebsregeln und der Zustandsraum ausgewertet. Für die folgenden Analysen werden Datensätze des Jahres 2009 mit jeweils 35040 Einzelwerten je Datenpunkt verwendet.

Die Betriebsdaten werden auf Übereinstimmung mit der Spezifikation überprüft. Entsprechend Gleichung 2 ist die Betriebsabweichung BA zwischen spezifiziertem Sollwert und dem gemessenen Istwert die Differenz beider Werte zu einem Zeitpunkt t, in diesem Fall der Werte für die Vorlauftemperatur des Heizkreises nach Gleichung 11.

Gleichung 11 $BA_{\vartheta_{VL,t}} = \vartheta_{VL,Ist,t} - \vartheta_{VL,Soll,t}$

Abbildung 54 zeigt die Betriebszustände und die Betriebsabweichung für alle drei Betriebszustände für das Jahr 2009, wobei die Werte für die Betriebsabweichung entsprechend der Farbskala dargestellt sind. Die Werte für den Zustand AUS, in dem keine Vorgabe für die Vorlauftemperatur spezifiziert ist, sind in schwarz dargestellt^{xxiv}.

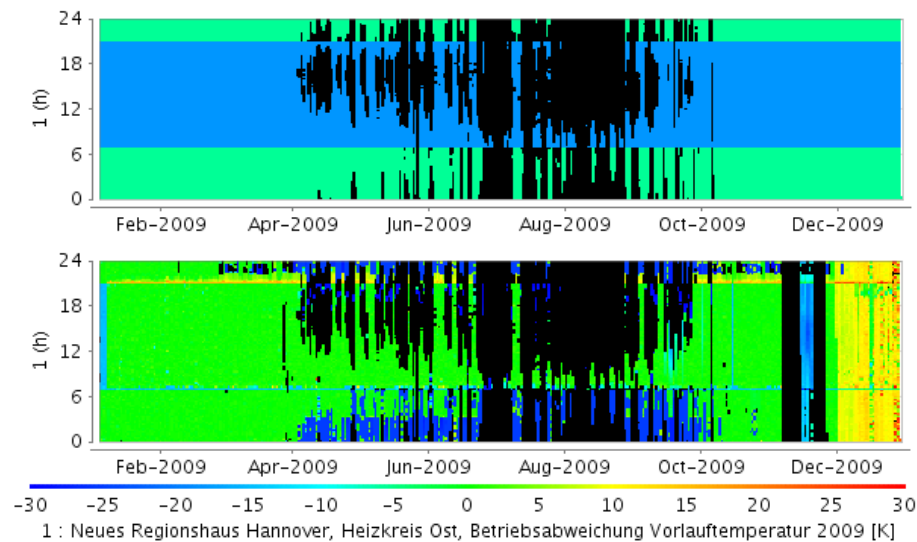


Abbildung 54 oben: Betriebszustände für den Heizkreis in einem Jahr (schwarz: BZ0/Aus, blau: BZ1/Normalbetrieb, grün: BZ2/Absenkbetrieb)
unten: Betriebsabweichung der Vorlauftemperatur (schwarz: Betriebszustand AUS)

Es sind erhebliche Betriebsabweichungen erkennbar, sowohl als Über- als Unterschreitungen der spezifizierten Werte. Zur Bestimmung geeigneter Grenzwerte werden die Betriebsabweichungen analysiert.

Abbildung 55 zeigt die absolute Häufigkeit der einzelnen Werte für die Betriebsabweichung für alle Zeitpunkte im Jahr 2009, in denen die Anlage in den Betriebszuständen Normal- und Absenkbetrieb war^{xxv}.

^{xxiv} Aus technischen Gründen sind auch Werte außerhalb des dargestellten Wertebereichs in schwarz dargestellt. Dies ist für die weiteren Auswertungen jedoch irrelevant.

^{xxv} Im Betriebszustand „Aus“ ist die Eigenschaft der Vorlauftemperatur nicht definiert, es liegt also kein Soll-Wert und damit auch kein Wert für die Betriebsabweichung vor.

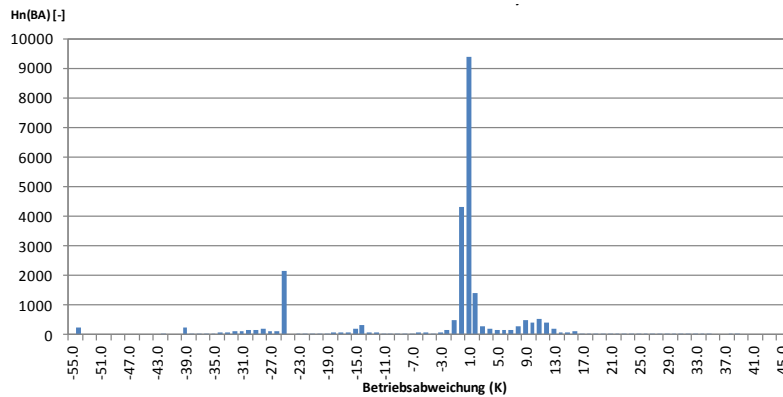


Abbildung 55 Häufigkeit der Betriebsabweichung (BA) bezogen auf die vorhandenen Betriebsdaten in 2009 in den Betriebszuständen Normal- und Absenkbetrieb ($n=24.693$)^{xxvi}

Als Betriebsabweichungen liegen insgesamt 24.693 Werte vor, überwiegend in Wertebereichen von -30 bis 20K. Die Häufigkeitsverteilung der Betriebsabweichungen wird zur weiteren Analyse entsprechend der erkennbaren Spitzen in vier Wertegruppen eingeteilt, Tabelle 10.

Tabelle 10 Wertebereiche für die Analyse der Betriebsabweichung

1:		$BA_t < -20K$
2:	-20K	$\leq BA_t < -5K$
3:	-5K	$\leq BA_t < 5K$
4:	5K	$\leq BA_t < 46K$

Im Folgenden wird untersucht, zu welchen Betriebszeiten die Betriebsabweichung im betrachteten Jahr in den entsprechenden Wertebereichen lag, um sachlogisch festzustellen, ob die Ursachen für die Betriebsabweichungen als systembedingt und damit unvermeidbar oder als fehlerhaft entsprechend Abschnitt 5.4 zu bewerten sind.

Bereich 1 ($BA_t < -20K$), Abbildung 56

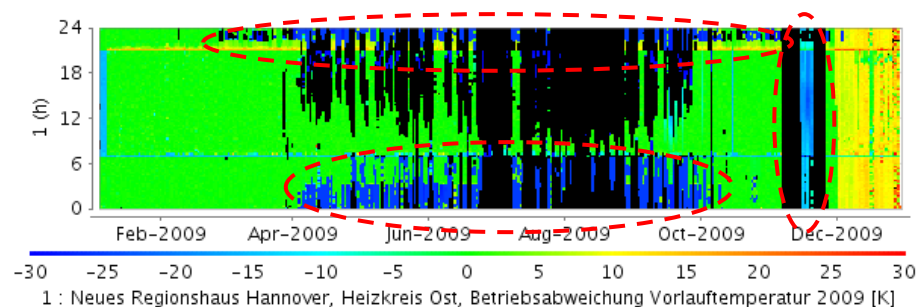


Abbildung 56 Betriebsabweichung $BA_t < -20K$ (Farbwerte dunkelblau und schwarz, markiert)

^{xxvi} Für die Darstellung wurden alle vorliegenden Werte verwendet. Zur besseren Lesbarkeit wurden die Werte im Bereich -55,5 bis 46,5 K dargestellt. Die Klassifizierung erfolgte mit einer Klassenbreite von $d_i=1,0K$.

Die Daten in Bereich 1 liegen fast ausschließlich im Absenkbetrieb im Sommer vor. Sie haben überwiegend einen Wert von rund -25K. Vermutlich schaltet die Pumpe hier ab oder reduziert den Volumenstrom sehr stark. Dies kann bei einigen Messdatenerfassungssystemen dazu führen, dass (M-Bus-) Wärmemengenzähler keinen Durchfluss mehr messen. Um einen möglichst geringe Datenrate zu erreichen, werden dann auch keine Istwerte für die Vor- und Rücklauftemperaturen übergeben. Entsprechend wird nach Gleichung 11 ein Wert von -25 K (bzw. entsprechend Kennlinienfunktion mit einem Sockelwert von 25°C) als Betriebsabweichung angegeben. Der Fehler liegt hier in der Mess- und Datentechnik, sind also vermeidbar und damit qualitätsbedingt. Auf Grund der fehlenden Daten kann allerdings nicht ausgeschlossen werden, dass hier gleichzeitig auch systembedingte Fehler vorliegen.

In der Woche 9.-26.11 traten zwei Fehler in der MSR auf. Zum einen wurde als Werte für die Außenlufttemperatur fehlerhafter Weise der Wert „0“ von der Gebäudeautomation übergeben. Entsprechend wurden mit den Kennlinienfunktionen falsche Sollwerte für die Vorlauftemperatur berechnet. Zum Anderen wurden für den Zeitraum vom 9.-28.11. für den IST-Wert der Vorlauftemperatur (a) keine Werte bzw. (b) der Wert „0“ übergeben. Entsprechend liegen in diesem Zeitraum keine Werte (a) oder Werte mit einer Betriebsabweichung $BA_t < -35 \text{ K}$ (b) vor. Diese sind in den Carpetplots schwarz dargestellt.

Bereich 2 ($-20\text{K} < BA_t < 5\text{K}$), Abbildung 57.

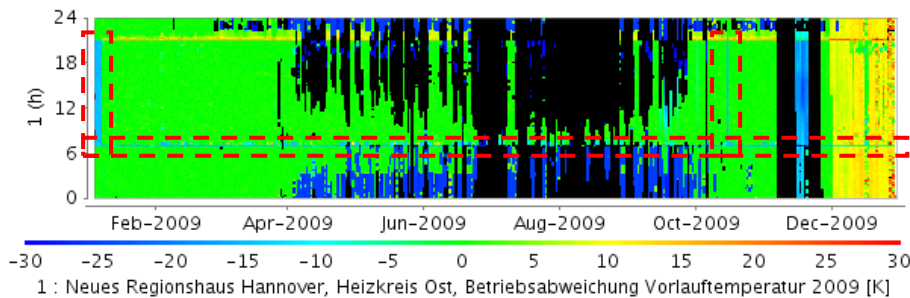


Abbildung 57 Betriebsabweichung $-20\text{K} \leq BA_t < -5\text{K}$ (Farbwerte hellblau, markiert)

Bereich 2 umfasst im Wesentlichen Werte zum Zeitpunkt des Umschaltens von Absenk- in Normalbetrieb. An dieser Transition erhöht sich der Sollwert spontan, sodass der Istwert der Vorlauftemperatur der Vorgabe nicht sofort folgen kann. Dementsprechend liegt kurzzeitig eine systembedingte Betriebsabweichung in der Größenordnung des Abstands der beiden Kennlinien für die Vorlauftemperatur von ca. 15K vor.

Am 1.1.-4.1. und am 17.10.2009 lief die Anlage vermutlich durchgängig im Absenkbetrieb und entsprechend am Tag mit einer Betriebsabweichung von ca. -15K. Ursache könnte ein Handbetrieb gewesen sein, also ein Eingriff des Betriebspersonals, durch den von Normalbetrieb auf Absenkbetrieb umgeschaltet wurde. In diesem Fall läge die Ursache der Betriebsabweichung also in der Betriebsführung und wäre qualitätsbedingt.

Bereich 3 ($-5\text{K} < BA_t < 5\text{K}$)

In Bereich 3 entspricht der Istwert mit geringer Abweichung dem Sollwert, so dass dies als systembedingte Betriebsabweichung bewertet werden kann. Die Werte liegen sowohl im Normal- als auch im Absenkbetrieb vor.

Bereich 4 ($5K < BA_t < 46K$), Abbildung 58

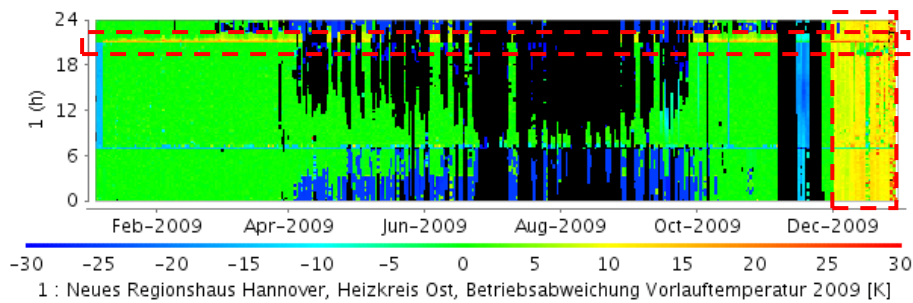


Abbildung 58 Betriebsabweichung $5K < BA_t < 46K$ (Farbwerte orange/rot, markiert)

Betriebsabweichungen treten in diesem Bereich jeweils unmittelbar nach dem Umschalten von Normal- in Absenkbetrieb auf. Ursache der erhöhten Betriebsabweichung ist, dass der berechnete Sollwert plötzlich abgesenkt wird und die Regelung hier nur zeitversetzt im Laufe von ca. 30-60 Minuten folgen kann, in dem das Ventil schließt, die Pumpe abschaltet und der Vorlauf (ohne Einwirkung der Automation) auskühlt. Dieser Vorgang ist eine systembedingte Betriebsabweichung, die auftretende Betriebsabweichung mithin nicht als Fehler zu bewerten.

Demgegenüber sind im Dezember 2009 fast alle Werte erhöht. Dies ist kein systembedingter Fehler. Vielmehr ist davon auszugehen, dass durch den Betreiber oder im Rahmen einer Wartung die Regelung verändert bzw. die Heizkennlinie angehoben wurde, also ein Betriebsfehler vorliegt.

Geeignete Grenzwerte für die Betriebsabweichung für diese Eigenschaft und diesen Anlagentyp werden aus den Betriebsdaten abgeleitet. Die Daten zeigen, dass die Betriebsdaten mit großer Häufigkeit mit nur geringer Betriebsabweichung der Spezifikation entsprechen (Bereich 3). Tabelle 11 zeigt den Anteil der Werte, die innerhalb verschiedener Grenzen für die Betriebsabweichung liegen.

Tabelle 11 Betriebsdaten innerhalb der Grenzwerte

$BA_{t,lim,top}$	+1 K	+2 K	+3 K
$BA_{t,lim,bottom}$	-1 K	-2 K	-3 K
Anzahl der Messzeitpunkte, für die eine Betriebsregel im Betrachtungszeitraum spezifiziert ist	24693	24693	24693
Anzahl der Werte innerhalb der Grenzwerte	14096	15648	16042
Anteil der Werte innerhalb der Grenzwerte bezogen auf die Anzahl der Zeitpunkte im Betrachtungszeitraum, für die eine Betriebsregel spezifiziert ist	57%	63%	65%
Anzahl aller Messzeitpunkte im Betrachtungszeitraum	35040	35040	35040
Anzahl der Messzeitpunkte, für die der Zustandsraum gültig ist (einschließlich der Zeitpunkte, für die keine Spezifikation vorliegt)	24443	25995	26389
Anteil der Messzeitpunkte, für die der Zustandsraum gültig ist	70%	74%	75%

Für die Betriebsabweichung werden für die weitere Bearbeitung Grenzwerte entsprechend Gleichung 12 festgelegt.

Gleichung 12 $BA_{t,lim,top} = 2 K$ und $BA_{t,lim,bot} = -2 K$

Von den untersuchten Betriebsdaten für die Vorlauftemperatur im Normal- und Absenkbetrieb liegen für das Jahr 2009 63% innerhalb der Grenzen. Da für den betrachteten Zeitraum verschiedene qualitätsbedingte fehlerhafte Betriebsweisen festgestellt wurden, würde der Anteil bei vollständig korrektem Betrieb mit ausschließlich systembedingten Fehlern entsprechend höher liegen.

Systembedingte Abweichungen liegen vor im zeitlichen Zusammenhang mit Transitionen zwischen zwei Betriebszuständen (Bereiche 2 und 4). Mit zwei täglichen Transitionen mit Angleichungszeiträumen von jeweils rund einer Stunde liegt die zu erwartende Zahl systembedingter, fehlerhafter Werte am Tag bei weniger als 10% von 96 Zeitpunkten. Diese Fehler im Zusammenhang mit Transitionen sind systembedingt und können vom Errichter regelungstechnisch nicht bzw. nicht mit vertretbarem Aufwand vermieden werden. Bei der im Folgenden dargestellten Bewertung der *Betriebsgüte* ist deshalb eine entsprechende Toleranz zu berücksichtigen.

Mit den im vorhergehenden Abschnitt festgelegten Grenzwerten wird die Qualität der Funktion im Betrieb in Bezug auf die Übereinstimmung mit den in Tabelle 9 spezifizierten Betriebsregeln ausgewertet, siehe Abbildung 59.

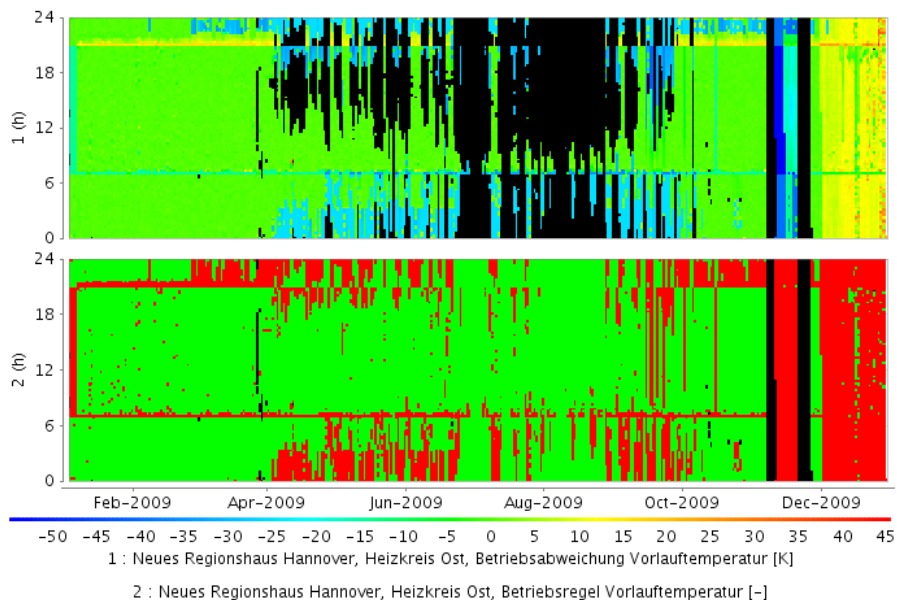


Abbildung 59 oben: Betriebsabweichung
 (1, Farbskala)
 Betriebsregel
 (2, grün: TRUE, rot/schwarz^{xxvii}: FALSE)

Es ist zu beachten, dass für die Zeitpunkte, für die keine Betriebsregel definiert worden ist, der Zustand als gültig ausgewertet wird. Da im Betriebszustand BZ0/AUS keine Vorgabe für die Betriebsabweichung definiert ist, liegt entsprechend der in Abschnitt 5.6 dargestellten Auswertungslogik hier auch kein Fehler vor.

Die Auswertung des gesamten Zustandsraums entspricht der Auswertung des jeweils gültigen Betriebszustands.

^{xxvii} Aus technischen Gründen im verwendeten Demonstrator sind fehlerhafte Werte, die auf fehlende Werte zurückzuführen sind, schwarz dargestellt.

Abbildung 60 zeigt die Betriebsgüte für die verschiedenen Zeitspannen für das Jahr 2009 chronologisch und als sortierte Menge von Werten.

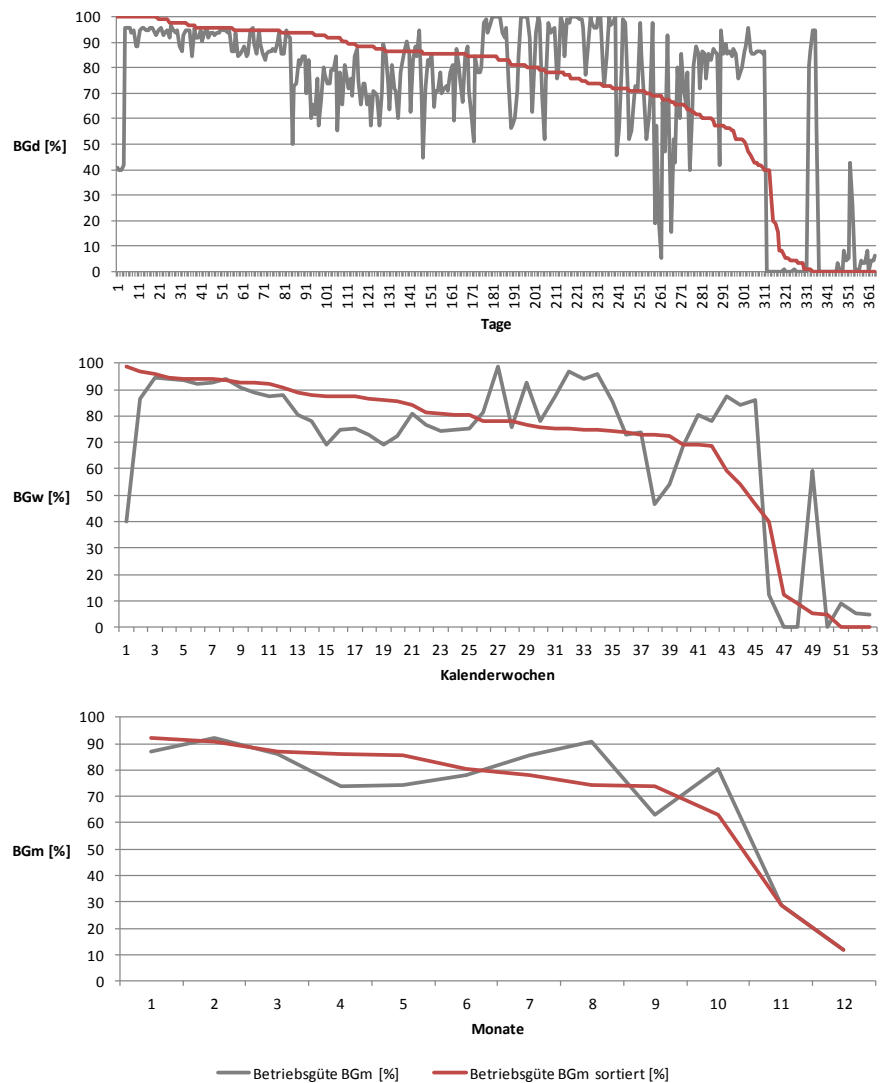


Abbildung 60 Betriebsgüten BG_{day} , BG_{week} , BG_{month} für das Jahr 2009, chronologisch und sortiert

In Tabelle 12 sind ergänzend die Werte für Vierteljahre und das gesamte Jahr 2009 dargestellt.

Tabelle 12 Betriebsgüte für die Vierteljahre und des gesamten Jahr 2009

	Q1	Q2	Q3	Q4	2009
$BG_{\text{quarter}}, BG_{\text{year}}$	88%	75%	80%	40%	71%

Aus den Ergebnissen können geeignete Grenzwerte für die Betriebsgüte abgeleitet werden. Gut erkennbar ist, dass an den Tagen zu Beginn des Jahres, an denen nur systembedingte Fehler aufgetreten sind, Betriebsgüten von $BG_{\text{day}} > 90\%$ erreicht werden. Gleiches gilt für die Tage im Sommer, an denen die Anlage durchgehend im Betriebszustand BZ0/AUS war und keine Eigenschaften definiert waren. Im Gegensatz dazu liegt die Betriebsgüte in Zeiten mit qualitätsbedingten Fehlern im Betriebszustand 2/Absenkbetrieb im Sommer und im Dezember überwiegend unter 80%.

Für alle Zeitspannen ist erkennbar, dass im Dezember bzw. im vierten Quartal, in dem überwiegend erhebliche qualitätsbedingte Fehler vorlagen, die Betriebsgüte deutlich niedriger ist. In Tabelle 13 ist eine „vorsichtige“ Definition von Grenzwerten dargestellt, die eine Identifikation dieser Qualitätsmängel ermöglicht. Zu beachten ist, dass in diesem Fall bei der Angabe von Grenzwerten für die Betriebsgüte die Grenzwerte für die Betriebsabweichung von $\pm 2K$ mit zu nennen sind.

Tabelle 13 Grenzwerte für die Betriebsgüte des Zustandsraums

Betriebsgüte für Zeitspannen	Grenzwert
$BG_{\text{day}} (\vartheta_{VL}; \pm 2K)$	80%
$BG_{\text{week}} (\vartheta_{VL}; \pm 2K)$	80%
$BG_{\text{month}} (\vartheta_{VL}; \pm 2K)$	80%
$BG_{\text{quarter}} (\vartheta_{VL}; \pm 2K)$	80%
$BG_{\text{year}} (\vartheta_{VL}; \pm 2K)$	80%

Nach entsprechender Validierung für eine repräsentative Anzahl von Systemen können diese Grenzwerte vermutlich noch höher angesetzt werden, um dann als Mindestanforderungen an Automationsanlagen spezifiziert zu werden.

Kritisch muss in diesem Zusammenhang die Anzahl der Transitionen betrachtet werden, in deren Nähe es zu systembedingten Fehlern kommt. Systeme mit einer hohen Frequenz von Transitionen würden entsprechend mehr systembedingte Fehler aufweisen. Allerdings wäre ein Heizkreis mit ständigen Zustandswechseln als System mit zunehmend nicht spezifizierten Eigenschaften wenig effektiv. Das Problem wird deshalb in der Praxis voraussichtlich keine signifikante Rolle spielen.

Es wurde eine Spezifikation der witterungsgeführten Vorlauftemperatur in der Aktiven Funktionsbeschreibung entwickelt, mit der auch eine Überprüfung und Bewertung der Übereinstimmung von Spezifikation und Betrieb durchgeführt werden konnte. Mit den Grenzwerten für Betriebsabweichung und Betriebsgüte wurde eine Mindestanforderung an die Betriebsqualität einer Heizkreisregelung mit witterungsgeführter Vorlauftemperatur definiert.

6.1.5 Temperaturspreizung

Die Temperaturspreizung zwischen Vorlauf- und Rücklauftemperatur ist keine Regelgröße des Heizkreises, kann jedoch als Indikator für dessen korrekte Funktion verwendet werden.

Die Wärmeleistung eines Heizkreises ergibt sich nach Gleichung 13.

Gleichung 13 $\dot{Q} = \dot{m} * c * (\vartheta_{VL} - \vartheta_{RL})$

mit	\dot{Q}	Wärmeleistung bzw. Heizleistung [W]
	\dot{m}	Massenstrom des Heizmediums Wasser [kg/h]
	c	Spezifische Wärmekapazität Wasser [J/(kgK)]
	ϑ_{VL}	Temperatur des Vorlaufs [°C]
	ϑ_{RL}	Temperatur des Rücklaufs [°C].

Um Verteilungsverluste und den Stromverbrauch für die Umwälzpumpe zu minimieren, sollen der Massenstrom und die Vorlauftemperatur bei für alle angeschlossenen Räume ausreichender Heizleistung so gering wie möglich sein. Diese, in der Planung angenommene Zielsetzung erfordert in der Praxis eine exakte hydraulische Einregulierung des gesamten Heizkreises, um jeden einzelnen Heizkörper ausreichend zu versorgen.

Es besteht in der Praxis das Risiko, dass der hydraulische Abgleich vernachlässigt wird und durch einen erhöhten Massenstrom mit einhergehendem erhöhtem Stromverbrauch und höheren Verteilverlusten kompensiert wird. Bei gleichbleibender Vorlauftemperatur und Heizleistung in den Räumen reduziert sich dann nach Gleichung 13 die Temperaturspreizung zwischen Vor- und Rücklauf. Um einen effizienten Betrieb zu gewährleisten, kann also ein Mindestmaß für die Temperaturspreizung spezifiziert werden, um einen hydraulisch abgeglichenen Heizkreis sicherzustellen und einen überhöhten Massenstrom zu vermeiden. Eine exakte Vorgabe ist nicht sinnvoll, da die Temperaturspreizung keine Regelgröße ist^{xxviii}.

6.1.5.1 Analyse der konventionellen Funktionsbeschreibung

Die Temperaturspreizung wird in der Funktionsbeschreibung für den Auslegungspunkt mit 70°C für den Vorlauf bzw. 55°C für den Rücklauf, also mit 15K angegeben, Abbildung 61.

- ¹ Heizungsgruppen statische Heizung
Die Gebäudeseiten des Neubaus (Nord, Süd, West, Ost) und der Multifunktionsraum stellen je einen eigenen Regelkreis dar. Die Regelung erfolgt witterungsgeführt, jeweils über ein Dreiwegemischventil und eine Gruppenpumpe. Die Temperaturen im Auslegungsfall betragen 70°C Vorlauftemperatur und 55°C Rücklauftemperatur.

Abbildung 61 Auszüge aus der textlichen Beschreibung der Heizkreise in der Funktionsbeschreibung des Neuen Regionshauses Hannover (Büro HSK, Quelle: Region Hannover)²⁴²

Die Funktionsbeschreibung beschreibt an dieser Stelle keine Vorgabe für die Funktion des Heizkreises, sondern ein Detail der Planung. Eine Vorgabe in der Aktiven Funktionsbeschreibung für die Spreizung ist also eine zusätzliche funktionale Spezifikation.

^{xxviii} Die Leistungen für den hydraulischen Abgleich (Heizung) und die Regelung des Heizkreises (MSR) sind oft nicht Teil des gleichen Auftrag. Für eine Spezifikation mit dem Ziel einer eindeutig geschuldeten Leistung sollte die Leistung gemeinsam vergeben werden.

6.1.5.2 Spezifikation des Zustandsraums

In diesem Abschnitt wird gezeigt, dass auch die Eigenschaft der Temperaturspreizung zwischen Vorlauf- und Rücklauftemperatur für die funktionale Qualität des Heizkreises mit den Mitteln der Aktiven Funktionsbeschreibung spezifiziert werden kann.

Die Aktive Funktionsbeschreibung verwendet die gleichen Betriebszustände und den gleichen Zustandsmerker wie die Spezifikation der Umwälzpumpe in Abschnitt 6.1.3.2.

Die Temperaturspreizung kann bei höheren Außenlufttemperaturen auf Grund der Annäherung der Rücklauftemperatur an die Raumtemperatur nicht in gleicher Größe erreicht werden, wie bei niedrigen Außenlufttemperaturen. Für die Eigenschaft *Temperaturspreizung* $\Delta\vartheta$ wird deshalb über die Vorgaben der konventionellen Funktionsbeschreibung hinaus nach Abbildung 53 eine Kennlinie $C_{\text{Spreizung}}$ festgelegt, die die mindestens zu erreichende Temperaturspreizung als Funktion der spezifizierten Vorlauftemperatur definiert. Zusätzlich werden aus der Kennlinie zwei weitere Kennlinien abgeleitet, die jeweils einen 1 bzw. 2 K geringeren Mindestwert für die Temperaturspreizung spezifizieren. Sie werden genutzt, um verschiedenen Mindestanforderungen für die Temperaturspreizung bewerten zu können.

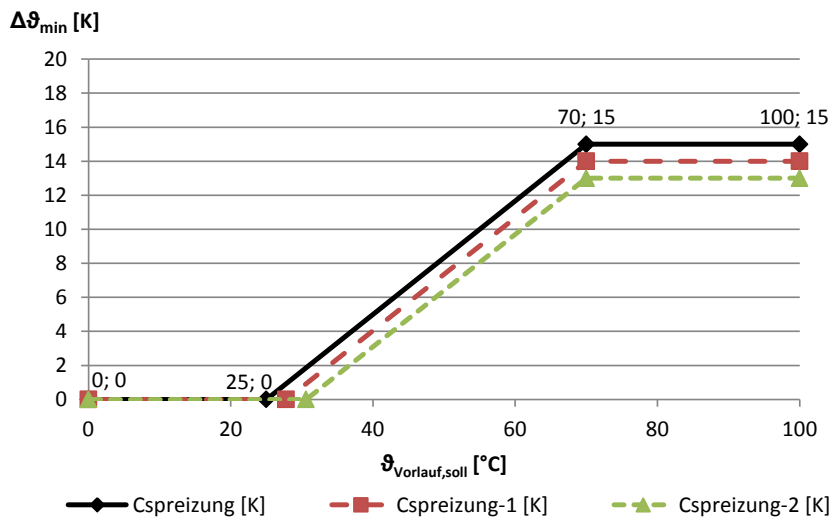


Abbildung 62 Kennlinie $C_{\text{Spreizung}}$

Als Betriebsregel wird definiert, dass die gemessene Temperaturspreizung zu jedem Zeitpunkt größer sein muss als der entsprechende Sollwert, siehe Gleichung 14.

$$\text{Gleichung 14} \quad \Delta\vartheta_{\text{Ist},t} > \Delta\vartheta_{\text{min},t}$$

Entsprechend ist ein Zustandsraum mit der Eigenschaft *Temperaturspreizung* entsprechend Tabelle 14 definiert.

Tabelle 14 Betriebszustände und Parametrisierung der Eigenschaften in der Aktiven Funktionsbeschreibung

	BZ0 / AUS	BZ1 / Normalbetrieb	BZ2 / Absenkbetrieb
Zustandsmerker ZM	!BZ1 && !BZ2	ZP && $\vartheta_{\text{amb}} < 18^{\circ}\text{C}$!ZP && $\vartheta_{\text{amb}} < 14^{\circ}\text{C}$
Temperaturspreizung	Keine Spezifikation	$\Delta\vartheta_{\text{Ist},t} > \Delta\vartheta_{\text{min},t}$	$\Delta\vartheta_{\text{Ist},t} > \Delta\vartheta_{\text{min},t}$

6.1.5.3 Auswertung des Zustandsraums

Im nächsten Schritt wird nun dargestellt, dass mit der Spezifikation auch die Bewertung der Betriebsdaten möglich ist. Für die folgenden Analysen werden Datensätze des Jahres 2009 mit jeweils 35040 Einzelwerten je Datenpunkt verwendet.

Da die Temperaturspreizung mit einem einzuhaltenden Grenzwert direkt als Regel spezifiziert wurde, ist eine Bestimmung einer Betriebsabweichung nicht erforderlich. Diese wird der Auswertung trotzdem vorangestellt, um eine Analyse der Betriebsabweichung und eine Bewertung der verschiedenen Kennlinien zu ermöglichen.

Die Betriebsabweichung wird zunächst auf Basis der Kennlinie $C_{\text{spreizung}}$ nach Gleichung 11 definiert.

Gleichung 15 $BA_{\Delta\theta,t} = \Delta\theta_{Ist,t} - \Delta\theta_{Soll,t}$

Die Betriebszustände und die Betriebsabweichung der Eigenschaft *Temperaturspreizung* $BA_{\Delta\theta}$ für das Jahr 2009 ist in Abbildung 63 dargestellt.

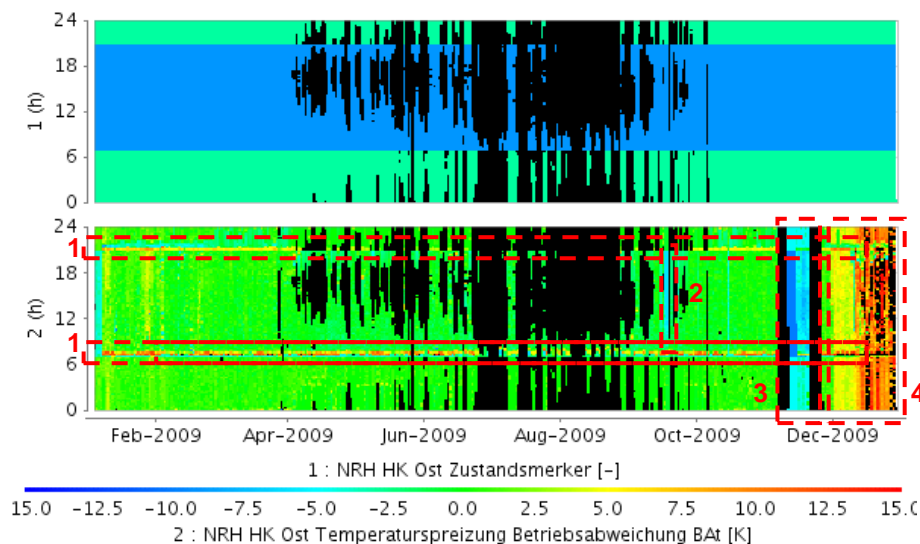


Abbildung 63 oben: Viertelstündliche Betriebszustände für den Heizkreis in einem Jahr (schwarz: 0/Aus, blau: 1/Normalbetrieb, grün: 2/Absenkbetrieb) unten: Farbskala

In Abbildung 63 sind drei wesentliche Gruppen von erhöhten Abweichungen erkennbar. Die mit „1“ bezeichneten Fehler sind bereits im Zusammenhang mit der Regelung der Vorlauftemperatur benannt worden. Hier liegen Transitionen zwischen den Betriebszuständen Normal- und Absenkbetrieb vor. Es handelt sich also um systembedingte Fehler.

Für die Fehler im Bereich „2“ mit großen Betriebsabweichungen im Betriebszustand 1/Normalbetrieb ist keine systembedingte Ursache erkennbar. Unter vergleichbaren Bedingungen liegen im gleichen Betriebszustand keine Fehler vor. Entsprechend werden diese Fehler als qualitätsbedingt bewertet.

Im Bereich „3“ liegen für rund 3 Wochen im November des Jahres keine oder fehlerhafte Daten vor, sodass kein Istwert für die Temperaturspreizung berechnet werden konnte. In der Folge wurde nach Gleichung 2 eine negative Betriebsabweichung aus Ist- und Sollwert berechnet.

Die mit „4“ bezeichneten Fehler entstehen durch die ebenfalls oben angesprochene Anhebung der Vorlauftemperatur. Entsprechend stieg auch die Temperaturspreizung. Die beiden Fehler „3“ und „4“ sind entsprechend qualitätsbedingte Fehler.

Abbildung 64 zeigt die Häufigkeit der Werte für die Betriebsabweichung im Jahr 2009.

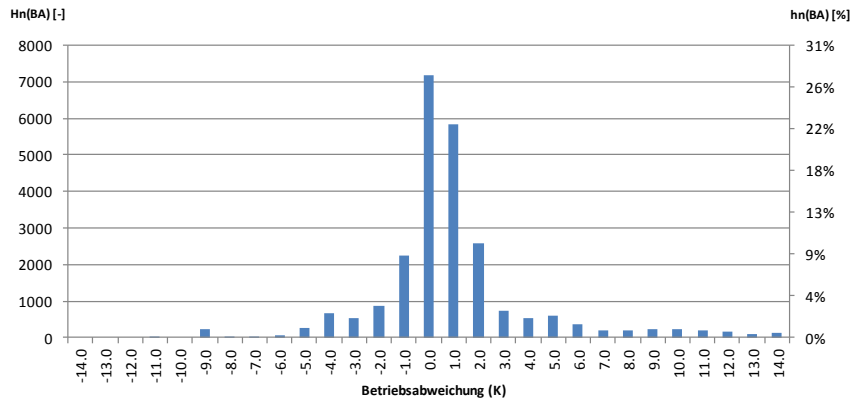


Abbildung 64 Häufigkeit der Betriebsabweichung (BA) bezogen auf die vorhandenen Betriebsdaten in 2009 in den Betriebszuständen Normal- und Absenkbetrieb (n=24.693)^{xxix}

Die Berechnung der logischen Betriebsabweichung zeigt, dass die Temperaturspreizung in Normal- und Absenkbetrieb zu den meisten Zeitpunkten in etwa dem mit der Kennlinie $C_{\text{Spreizung}}$ definierten Mindestwert entspricht. Dabei liegen 51,0 % aller Werte an Zeitpunkten, für die die Eigenschaft definiert ist, oberhalb des Mindestwerts, Tabelle 15.

Tabelle 15 Betriebsdaten innerhalb der Grenzwerte

$BA_{t,lim,bottom}$	$C_{\text{Spreizung}}$	$C_{\text{Spreizung-1K}}$	$C_{\text{Spreizung-2K}}$
Anzahl der Messzeitpunkte, für die eine Betriebsregel im Betrachtungszeitraum spezifiziert ist	24693	24693	24693
Anzahl der Werte mit $BA_t > BA_{t,lim,bottom}$	12589	17248	19504
Anteil der Werte innerhalb der Grenzwerte bezogen auf die Anzahl der Zeitpunkte im Betrachtungszeitraum, für die eine Betriebsregel spezifiziert ist	51%	70%	79%
Anzahl aller Messzeitpunkte im Betrachtungszeitraum	35040	35040	35040
Anzahl der Messzeitpunkte, für die der Zustandsraum gültig ist (einschließlich der Zeitpunkte, für die keine Spezifikation vorliegt)	12589	17248	19504
Anteil der Messzeitpunkte, für die der Zustandsraum gültig ist	36%	49%	56%

^{xxix} Für die Darstellung wurden alle vorliegenden Werte im Bereich -15 bis 15K berücksichtigt. Die Klassifizierung erfolgte mit einer Klassenbreite von 1,0K.

Da für den betrachteten Zeitraum fehlerhafte Betriebsweisen festgestellt wurden, würde der Anteil bei vollständig korrektem Betrieb entsprechend höher liegen.

Der Zustandsraum ist gültig, wenn die in Tabelle 14 dargestellten Betriebsregeln gültig sind. Abbildung 65 zeigt die Auswertung der jeweils gültigen Betriebsregeln für 2009 für die Kennlinien $C_{\text{spreizung}}$ und $C_{\text{spreizung-2K}}$.

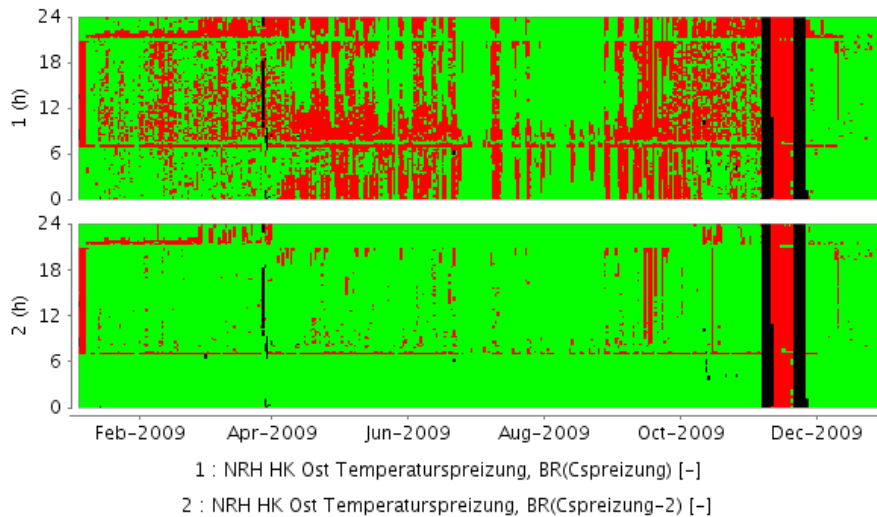


Abbildung 65 Auswertung der Betriebsregel Temperaturspreizung $\Delta\theta$ (grün: TRUE, rot: FALSE, schwarz: keine Auswertung möglich bzw. keine Eigenschaft definiert)

Die weitere Analyse und die Definition von Grenzwerten für die Betriebsgüte erfolgt auf Basis der Kennlinie $C_{\text{spreizung-2K}}$.

Die Auswertung des gesamten Zustandsraums entspricht der Auswertung des jeweils gültigen Betriebszustands.

In Abbildung 66 sind die Werte für die Betriebsgüte für verschiedene Zeitspannen für das Jahr 2009 chronologisch und als sortierte Menge von Werten dargestellt.

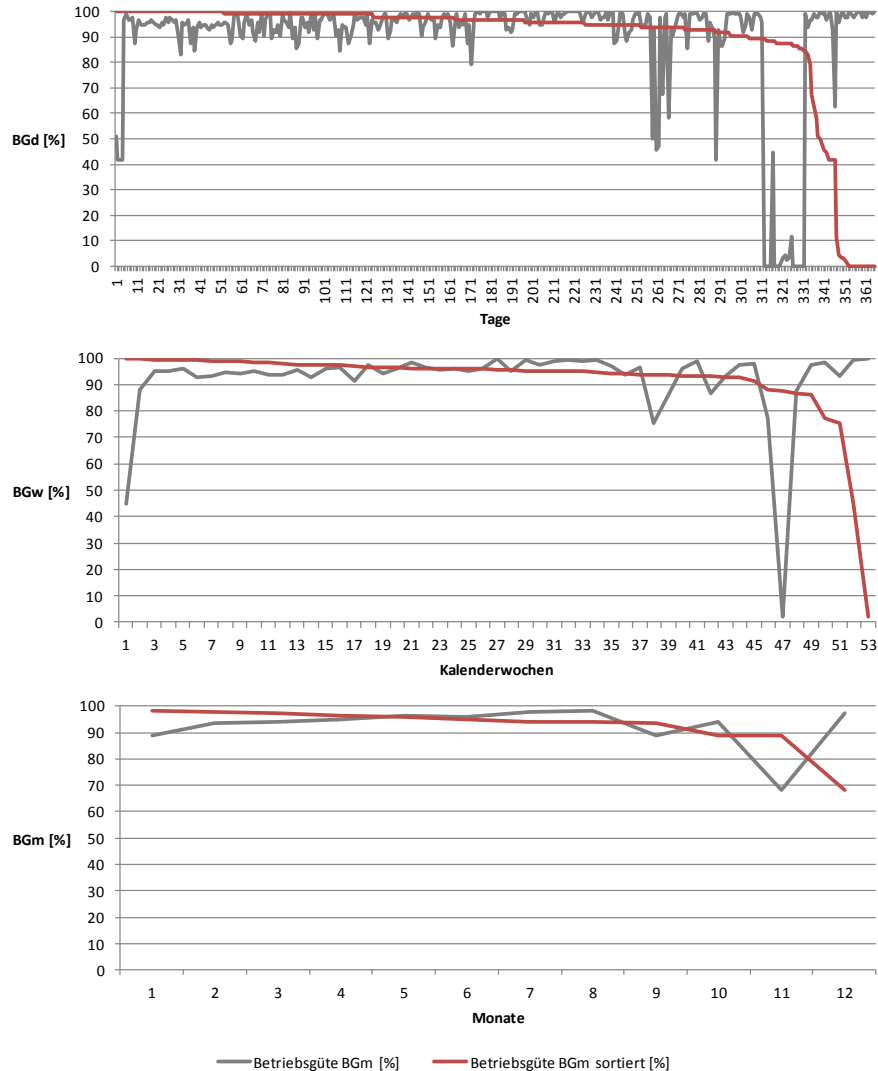


Abbildung 66 Betriebsgüten BG_d, BG_s, BG_m für das Jahr 2009, chronologisch und sortiert

In Tabelle 16 sind ergänzend die Werte für die Vierteljahre und das gesamte Jahr 2009 dargestellt.

Tabelle 16 Betriebsgüte für die Vierteljahre und des gesamten Jahr 2009

	Q1	Q2	Q3	Q4	2009
BG _q ; BG _y	92%	96%	95%	87%	92%

Die Betriebsgüte hängt für die Temperaturspreizung wie in Abbildung 65 gezeigt in hohem Maße von der gewählten Kennlinie ab. Aus den Ergebnissen für die Betriebsgüte werden deshalb für die hier verwendete Kennlinie in der Praxis erreichbare Mindestwerte für die Betriebsgüte abgeleitet, siehe Tabelle 17.

Tabelle 17 Grenzwerte für die Betriebsgüte des Zustandsraums

Betriebsgüte für Zeitspannen	Grenzwert
$BG_{day}(\Delta\vartheta; C_{spreizung-2})$	90%
$BG_{week}(\Delta\vartheta; C_{spreizung-2})$	90%
$BG_{month}(\Delta\vartheta; C_{spreizung-2})$	90%
$BG_{quarter}(\Delta\vartheta; C_{spreizung-2})$	90%
$BG_{year}(\Delta\vartheta; C_{spreizung-2})$	90%

Eine umfassende Analyse von Anlagen in der Praxis muss zeigen, welche Werte in der Praxis in gut eingestellten Systemen tatsächlich erreicht werden können.

Es wurde gezeigt, dass Spezifikation und Prüfung der Funktion möglich sind. Weiterführende Analysen sollten geeignete Ausprägungen der Kennlinie zu Definition von Mindestanforderungen für die Temperaturspreizung näher bestimmen. Dies war im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich.

6.1.6 Der Heizkreis als komplexer Zustandsraum

In den vorangegangenen Abschnitten wurde jeweils eine einzelne funktionale Eigenschaft der Anlage in einem Zustandsraum spezifiziert, um für diese Eigenschaft geeignete Grenzwerte für die Betriebsabweichung zu bestimmen. In diesem Abschnitt werden diese Eigenschaften nun gemeinsam in einem Zustandsraum definiert. Es wird gezeigt, dass auch komplexe funktionale Zusammenhänge mit der Aktiven Funktionsbeschreibung spezifiziert und automatisch überprüft werden können.

Der Zustandsraum wird mit den drei bereits oben definierten Zuständen und Eigenschaften spezifiziert.

Tabelle 18 Zustandsraum für den Heizkreis

	BZ0 / AUS	BZ1 / Normalbetrieb	BZ2 / Absenkbetrieb
Zustandsmerker	!BZ1 && !BZ2	ZP && $\vartheta_{\text{amb}} < 18^{\circ}\text{C}$!ZP && $\vartheta_{\text{amb}} < 14^{\circ}\text{C}$
Pumpe	$\dot{V} = 0$	Keine Spezifikation	Keine Spezifikation
Vorlauftemperatur ϑ_{VL}	Keine Spezifikation	$BA_{\text{lim},\text{bot}} < BA_{\vartheta_{\text{VL}}}$ $< BA_{\text{lim},\text{top}}$	$BA_{\text{lim},\text{bot}} < BA_{\vartheta_{\text{VL}}}$ $< BA_{\text{lim},\text{top}}$
Temperaturspreizung	Keine Spezifikation	$\Delta\vartheta_{\text{Ist},t} > \Delta\vartheta_{\text{min},t}$	$\Delta\vartheta_{\text{Ist},t} > \Delta\vartheta_{\text{min},t}$

Der Zustandsraum wird für 23.759 bzw. 68 % der insgesamt 35.040 viertelstündlichen Zeitpunkte im Jahr 2009 als gültig ausgewertet, siehe Abbildung 67.

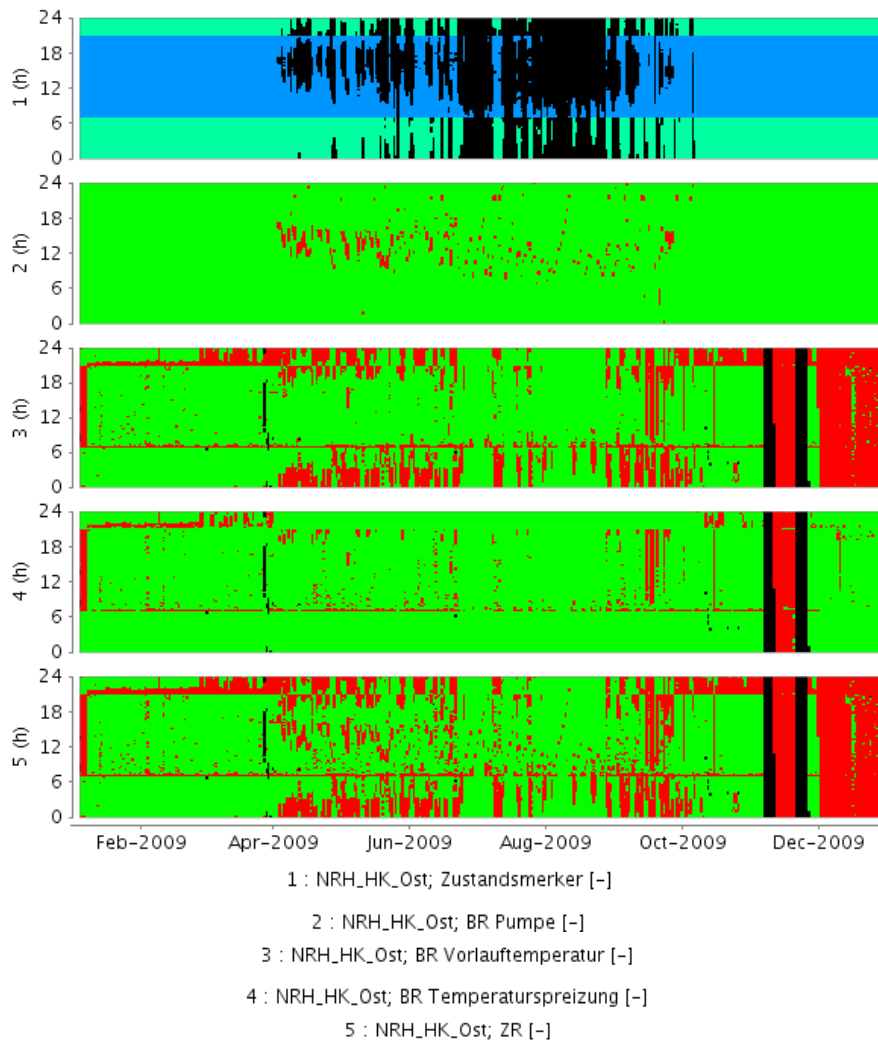


Abbildung 67 Auswertung von Zustandsmerker (1)
 (schwarz: BZ0, blau: BZ1, grün: BZ2)
 Auswertung der Betriebsregeln (2-4) und des Zustandsraum (5)
 grün: gültig, rot: ungültig

Entsprechend der Einzelauswertungen liegen die meisten ungültigen Werte im Bereich der Transitionen, in den Zeiten mit geringer Heizlast und im Dezember bei vermutlich veränderten Sollwerten der Automation.

In Abbildung 68 sind die Werte für die Betriebsgüte für verschiedene Zeitspannen für das Jahr 2009 chronologisch und als sortierte Menge von Werten dargestellt.

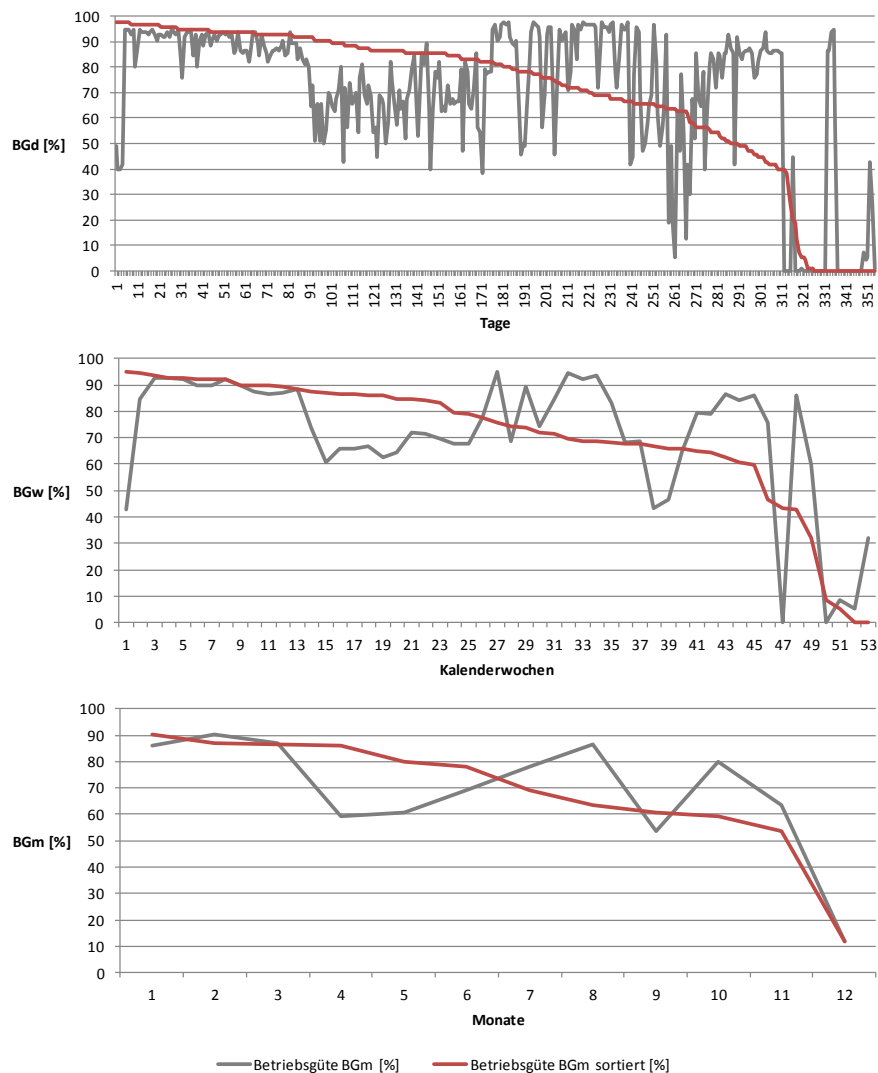


Abbildung 68 Betriebsgüten BG_d , BG_s , BG_m für das Jahr 2009, chronologisch und sortiert

In Tabelle 19 sind ergänzend die Werte für Vierteljahre und das gesamte Jahr 2009 dargestellt.

Tabelle 19 Betriebsgüte für die Vierteljahre und des gesamten Jahr 2009

	Q1	Q2	Q3	Q4	2009
$BG_{quarter}, BG_{year}$	88%	69%	76%	52%	68%

Die Kombination der Funktionen in einem Zustandsraum zeigt, dass auch in der gemeinsamen Spezifikation der Funktionen eine hohe Betriebsgüte für das Gesamtsystem erreichbar ist. Mindestwerte der Betriebsgüte von 75% werden an 206 von 365 Tagen im Jahr erreicht, ebenso an 27 von 52 Wochen und allen Monaten mit Ausnahme von November und Dezember,

in denen erhebliche Qualitätsprobleme vorlagen. Gleichzeitig sind die fehlerhaften Abschnitte am Jahresende mit Betriebsgüten von deutlich unter 50% in allen zeitlichen Auflösungen mit diesen Grenzen eindeutig abzugrenzen und damit erkennbar. Tabelle 20 zeigt die aus den Ergebnissen abgeleiteten Mindestwerte.

Tabelle 20 Grenzwerte für die Betriebsgüte des Zustandsraums

Betriebsgüte für Zeitspannen	Grenzwert	Grenzwert eingehalten an
$BG_{day}(ZR_{Heizkreis})$	75%	206 d/a
$BG_{week}(ZR_{Heizkreis})$	75%	27 Wochen/a
$BG_{month}(ZR_{Heizkreis})$	75%	6 Monaten/a
$BG_{quarter}(ZR_{Heizkreis})$	75%	2 Vierteljahre/a
$BG_{year}(ZR_{Heizkreis})$	75%	nicht eingehalten

Mit der gemeinsamen Darstellung dreier wesentlicher Funktionen eines statischen Heizkreises mit Rücklaufbeimischung in einer Aktiven Funktionsbeschreibung und der Auswertung von Betriebsdaten aus der Praxis konnte gezeigt werden, dass die Spezifikation der Funktionen in der Planung und die Prüfung des Systems im Betrieb hinsichtlich der Einhaltung dieser Vorgaben möglich ist.

6.1.7 Fazit zum statischen Heizkreis

Die Referenzanlage ist ein typisches, in der Praxis in dieser Form häufig verwendetes System. Es wurde gezeigt, dass wesentliche Vorgaben der konventionellen Funktionsbeschreibung mit Hilfe der Aktiven Funktionsbeschreibung dargestellt werden können. Gleichzeitig konnten mit der gleichen Beschreibung die Betriebsdaten für ein Jahr auf Übereinstimmung mit den Vorgaben überprüft werden. Für alle einzelnen Eigenschaften wurden festgestellt, dass eine Betriebsgüte von 80% bezogen auf verschiedene Zeitspannen möglich ist. Für den Zustandsraum der gesamten Anlagenfunktionalität wurde eine Betriebsgüte von 75% als systemtechnisch erreichbares Mindestmaß an Zielerreichung bestimmt. Eine Validierung und Optimierung dieser Grenzwerte kann mit der Methodik empirisch entwickelt werden. Der hier definierte Standard für die Betriebsgüte kann in der Praxis wie gezeigt sogar noch deutlich übertroffen werden.

6.2 Lüftungsanlage mit Zentralgerät

Durch Lüftungsanlagen soll in Innenräumen „ein zu allen Jahreszeiten behagliches und gesundheitlich unbedenkliches Innenraumklima“²⁴³ geschaffen werden. Der dazu erforderliche Austausch der Luft erfolgt mit Hilfe von Ventilatoren, die sich zumeist in Zentralgeräten befinden und von dort über ein Kanalnetz konditionierte Außenluft zu den Räumen führen und Abluft aus den Räumen abführen. Für die Regelung der Luftqualität gibt es abhängig von den vorhandenen Luftbehandlungsfunktionen Heizen, Kühlen, Be-/Entfeuchten und Wärmerückgewinnung verschiedene Strategien, die durch die Mess-, Steuer- und Regelungstechnik umgesetzt werden. In diesem Abschnitt werden die Möglichkeiten der Aktive Funktionsbeschreibungen am Beispiel einer Lüftungsanlage nachgewiesen.

6.2.1 Beschreibung der Referenzanlage

Als Referenzanlage wird einer Lüftungsanlage im Bürogebäude *Neues Regionshaus Hannover* untersucht. Sie dient der Be- und Entlüftung der WCs sowie verschiedener Nebenräume wie Archiven und Lagerräumen. Die Anlage mit einem maximalen Nennvolumenstrom von 5.000m³/h ist auf dem Dach des Gebäudes aufgestellt. Abbildung 69 zeigt das Schema der Anlage.

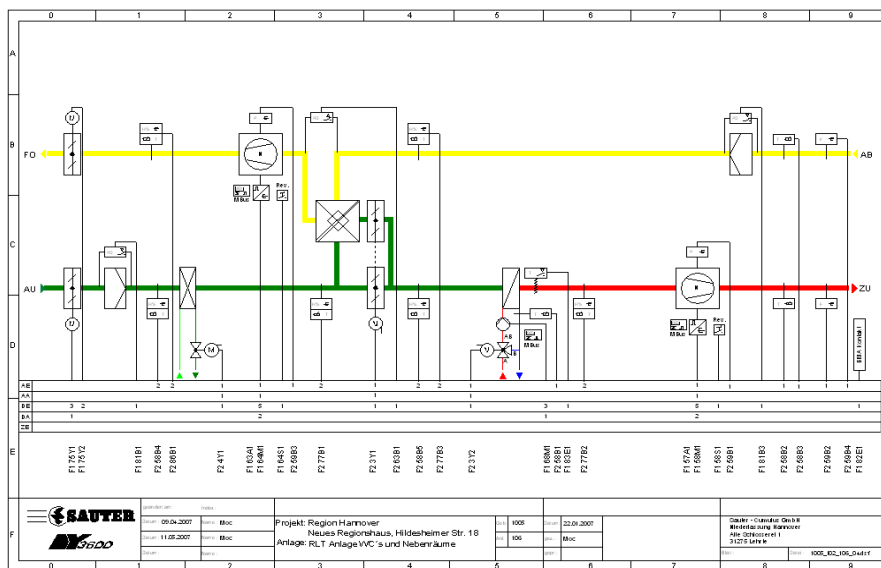


Abbildung 69 Anlagenschema des Zentralgeräts der Lüftungsanlage in der Funktionsbeschreibung des Neuen Regionshauses Hannover (Büro HSK, Quelle: Region Hannover)²⁴⁴

Die Anlage kann in zwei Stufen betrieben werden: in der ersten Stufe werden nur die WCs und Nebenräume in den Obergeschossen des Gebäudes versorgt, in der zweiten werden auch die Räume im Erdgeschoss zugeschaltet, die im Wesentlichen bei Veranstaltungen genutzt werden. Luftbehandlungsstufen sind in der Reihenfolge der Installation ein Vorerhitzer, der mit der Abwärme einer Kältemaschine versorgt wird, ein Kreuzstromwärmetauscher mit Bypassklappe sowie und ein Heizregister, das an den Wärmeverteiler angeschlossen ist.

6.2.2 Betriebsdaten

Die Erfassung der Betriebsdaten erfolgt wie in Abschnitt 6.1.2 beschrieben.

6.2.3 Steuerung der Betriebszeit

Eine große Bedeutung für den Energieverbrauch von Lüftungsanlagen hat ihre Betriebszeit. Der Betrieb von Lüftungsanlagen kann manuell, durch Zeitschaltprogramme oder durch eine entsprechende Sensorik (Temperatur, Bewegungsmelder, CO₂-Konzentration etc.) gesteuert werden. Eine Anlage sollte nur in Betrieb sein, wenn die Belüftung der angeschlossenen Räume auch notwendig bzw. erwünscht ist. Nach den am Bedarf in der Praxis orientierten Nutzungsprofilen der DIN V 18599 sollten die meisten Lüftungsanlagen die meiste Zeit abgeschaltet sein und nur während der Nutzungszeiten z.B. von Büros, Klassenräumen, WCs etc. betrieben werden. Laufen die Anlagen außerhalb dieser Bedarfszeiten, steigt der Stromverbrauch für die Ventilatoren sowie zur Luftbehandlung. Die Beschreibung und Einhaltung der Betriebszeiten ist deshalb in der Spezifikation und Überwachung von großer Bedeutung.

6.2.3.1 Analyse der konventionellen Funktionsbeschreibung

In der konventionellen Funktionsbeschreibung²⁴⁵ wird im Abschnitt zu dieser Lüftungsanlage zunächst der Aufbau der Anlage textlich wie grafisch beschrieben. Die eigentlichen Steuer- und Regelfunktionen der Anlage werden in Abschnitt 2.3 der Funktionsbeschreibung erläutert. Nach Darstellung der Möglichkeiten zur Inbetriebnahme der Anlage wird in Bezug auf die Betriebszeiten beschrieben, dass und in welchem Umfang Zeitschaltfunktionen vorhanden sind, Abbildung 70.

¹ 2.3.2 Zeitschaltfunktionen

Das Ausführen von individuellen, zeitabhängigen Schaltaufträgen durch die DDC-Regelung ist durch Zeitkanäle frei definierbar möglich. Jedem Auftrag können für mindestens ein Jahr im voraus Tageskennung und Betriebszeiten zugeordnet werden. Dabei kann das DDC-

- ⁵ System mindestens 8 Tagestypen mit unterschiedlicher Zeitgestaltung verarbeiten. Pro Tagestyp können mindestens 8 Auftragszeiten festgelegt werden, wobei die Aufträge tagesübergreifend sein können, z.B. Einschaltung am ersten Tag und Ausschaltung am zweiten Tag. Die Schaltzeiten können an der GLT eingestellt werden.

Abbildung 70 Beschreibung der Zeitschaltfunktionen²⁴⁶

Die Festlegung der Schaltzeiten erfolgt jedoch nicht: die im weiteren Verlauf des Dokuments eingefügte Tabelle ist nicht ausgefüllt.

Nach den Erläuterungen von Schutzfunktionen für die Anlage zum Frostschutz, regelmäßigem Pumpenlauf und der Filterüberwachung sowie zur Steuerung der Außen-, Fortluft- und Bypassklappen des Kreuzstromwärmetauschers folgen Beschreibungen zur Steuerung der Zonen-Absperrklappen und der Ventilatoren, Abbildung 71.

1 2.3.13 Steuerung der Zonen-Absperrklappen

Im Luftkanalsystem sind die zwei Zonen WC's 1.OG - 5.OG und WC's EG + Küche + Stuhllager durch Zonen-Absperrklappen voneinander getrennt. Die Zone WC's 1.OG - 5.OG wird über ein Zeitprogramm gesteuert. Die Zone WC's EG + Küche + Stuhllager wird im Regelfall am Ferntableau bzw. durch die Inbetriebnahme des Küchenabluftventilators dazugeschaltet. Folgende Betriebsmodi sind möglich:

- | | |
|--|--|
| • Zone 1: WC's 1.OG - 5.OG aus | Zone 2: WC's EG + Küche + Stuhllager aus |
| • Zone 1: WC's 1.OG - 5.OG an (Zeitprogramm) | Zone 2: WC's EG + Küche + Stuhllager aus |
| • Zone 1: WC's 1.OG - 5.OG an (Zeitprogramm) | Zone 2: WC's EG + Küche + Stuhllager an |

Die Zonen-Absperrklappen verfügen über einen elektromotorischen 2-Punkt-Antrieb. Im Betriebsfall werden diese Jalousieklappen nach Freigabe geöffnet. Die Zu- und Abluftklappen einer Zone werden über einen gemeinsamen Stellbefehl (Master / Slave) angesteuert. Im Antrieb integrierte Endlagenschalter melden die Endlage „Auf“ bzw. „Zu“ jeder einzelnen Klappe an die DDC-Regelung. Diese übergibt das Signal an die GLT.

2.3.14 Steuerung der Ventilatoren

Die Drehzahl der Zu- und Abluftventilatoren des Klimagerätes werden mittels Frequenzumrichter auf eine bestimmte Drehzahl geregelt. Fällt die DDC-Regelung oder die Regelung des Frequenzumrichters im Schadensfall aus, werden die Ventilatoren über eine Bypass-Schaltung in die höchste Betriebsstufe gefahren.

Folgende Betriebsmodi mit einem bestimmten Volumenstrom sind möglich:

- | | |
|--|--|
| • Zone 1: WC's 1.OG - 5.OG an (Zeitprogramm) | Zone 2: WC's EG + Küche + Stuhllager aus |
| • Zone 1: WC's 1.OG - 5.OG an (Zeitprogramm) | Zone 2: WC's EG + Küche + Stuhllager an |
| • FU-Bypass: bei Ausfall der FU-Regelung fahren die Ventilatoren in die höchste Betriebsdrehzahl | |

Der Abluftventilator Küche ist zweistufig schaltbar und wird von Hand über einen Schalter vor Ort in Betrieb genommen. Die Entlüftung der Küche erfolgt grundsätzlich in der ersten Drehzahlstufe. Bei höherer Belastung kann der Ventilator per Hand in die zweite, höhere Drehzahl geschaltet werden.

Abbildung 71 Steuerung von Klappen und Ventilatoren²⁴⁷

Bemerkenswert ist mit Blick auf die in dieser Arbeit vorgestellte Methode, dass hier verschiedene „Betriebsmodi“ beschrieben werden, die unterschiedlichen Betriebszuständen der Anlage entsprechen (4-8, 18-22). Auf Grund der Struktur des Kanalnetzes können die Nebenräume im Erdgeschoss (Zone 2) nur belüftet werden, wenn gleichzeitig auch die WCs in den Obergeschossen (Zone 1) belüftet werden^{xxx}. Die Ventilatoren können entsprechend neben dem ausgeschalteten Zustand in zwei verschiedenen Stufen betrieben werden^{xxxi}.

6.2.3.2 Spezifikation des Zustandsraums

Im Folgenden wird gezeigt, dass die in der konventionellen Funktionsbeschreibung dargestellten Spezifikationen für die Betriebszeiten der Lüftungsanlage mit den Mitteln der Aktiven Funktionsbeschreibung spezifiziert werden können. Der Nachweis folgt dem Vorgehen der vorherigen Abschnitte.

Für die Entwicklung der aktiven Funktionsbeschreibung bildet die Definition der „Betriebsmodi“ in der konventionellen Funktionsbeschreibung den Ausgangspunkt. Es werden drei Betriebszustände spezifiziert:

BZ0/AUS (kein Anlagenbetrieb)

BZ1/Belüftung Zone 1

BZ2/Belüftung Zone 1+2.

^{xxx} Die Darstellung in der konventionellen Beschreibung ist in Bezug auf das Zeitprogramm für Zone 1 irreführend: es unterstellt, dass Zone 2 nur während der Betriebszeiten manuell zugeschaltet werden kann. Tatsächlich wird aber über das Einschalten von Zone 2 die Lüftung für Zone 1 erzwungen. Ein ausschließlicher Betrieb von Zone 2 ist hydraulisch nicht möglich.

^{xxxi} Der genannte Küchenabluftventilator wird hier vernachlässigt.

Da kein Zustandsmerker aus der Automation übergeben wurde, wird für die Kennzeichnung der Betriebszustände ein virtueller Zustandsmerker auf Basis der im Lüftungsgerät gemessenen Gesamtdruckerhöhung Δp eingeführt. Um die Räume ausreichend zu belüften, müssen die Ventilatoren in jedem Betriebszustand einen entsprechenden Druck aufbauen. Im abgeschalteten Zustand bauen die Ventilatoren keinen Druck auf. Entsprechend kann der Gesamtdruck als zuverlässiger Zustandsmerker für den Betriebszustand interpretiert werden.

Der Zustandsmerker wurde aus den Häufigkeitsverteilungen der Betriebswerte für Zu- und Abluftdruck in 2009 abgeleitet, Abbildung 72.

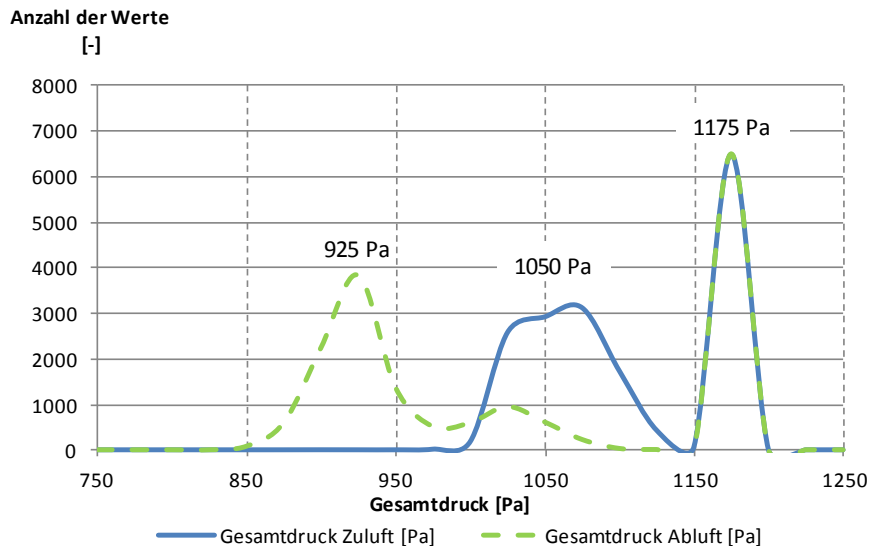


Abbildung 72 Häufigkeitsverteilung der gemessenen Gesamtdrucke in 2009

Der Merker wurde auf Basis des Gesamtdrucks der Abluft wie folgt definiert:

BZ0 gilt, wenn $\Delta p < 750$ Pa ist.

BZ1 gilt, wenn $\Delta p > 750$ Pa und $\Delta p < 1120$ Pa ist.

BZ2 gilt, wenn $\Delta p > 1120$ Pa ist.

Der Betrieb der Anlage für Zone 1 (ohne Zone 2) wird durch ein Zeitprogramm gesteuert. Deshalb ist *Zeitprogramm (ZP)* die zu prüfende Eigenschaft in der spezifizierten Betriebsregel. Geprüft wird, ob der Betriebszustand innerhalb der für ihn spezifizierten Betriebszeit vorliegt. Die Prüflogik dreht hierbei die möglicherweise intuitive Vorstellung um: die Betriebsregel prüft nicht, ob um z.B. 07:15 Uhr Betriebszustand 1 vorliegt, sondern ob, wenn Zustand 1 vorliegt, einer der nach Zeitprogramm entsprechend spezifizierten Zeitpunkte vorlag, also die Eigenschaft *Zeitprogramm* gültig war.

Da in der konventionellen Funktionsbeschreibung die Zeitschaltfunktionen nicht parametrisiert sind, werden plausible Sollwerte aus Betriebsdaten für das Jahr 2009 abgeleitet. Als Zeitprogramm für den Betrieb der Zone 1 werden die Betriebszeiten einer typischen Woche (27.4. bis 4.5.2009) aus dem Verlauf des Gesamtdrucks Zuluft abgeleitet und entsprechend Tabelle 21 spezifiziert.

Tabelle 21 Spezifikation der Betriebszeiten Belüftung Zone 1

Wochentage	Uhrzeit
Montag bis Freitag	5:00 – 17:00 Uhr
Samstag	8:00 – 10:00 Uhr

Da für die Tage unterschiedliche Betriebszeiten vorgegeben sind, werden zwei Zeitprogramme in der Aktiven Funktionsbeschreibung definiert, siehe Abbildung 73.

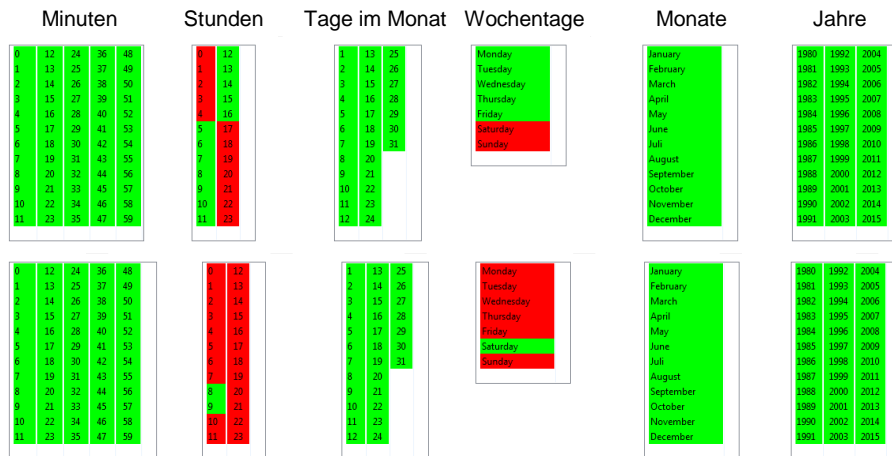


Abbildung 73 Zeitprogramme für den Betrieb der Lüftungsanlage in Stufe 1 (ZP1: Mo.-Fr. (oben), ZP2: Sa. (unten); grün=gültig)

Als gemeinsames Zeitprogramm gilt entsprechend Gleichung 16.

Gleichung 16 ZP implies ZP1 || ZP2

Da BZ2/Belüftung Zonen 1+2 manuell eingeschaltet wird, kann die Betriebszeit für diesen Zustand nicht als Eigenschaft spezifiziert werden. Dies ist entsprechend auch in der konventionellen Funktionsbeschreibung nicht möglich. Für BZ0/AUS kann aus diesem Grund auch keine eindeutige Spezifikation entwickelt werden, wann die Anlage abgeschaltet sein muss. Es kann jedoch als Negation definiert werden, dass das Zeitprogramm in Betriebszustand 1 nicht gilt.

Aus den spezifizierten Betriebszuständen und Eigenschaften wird ein Zustandsraum mit der Betriebsregel *Zeitprogramm* (ZP) entsprechend Tabelle 22 definiert.

Tabelle 22 Betriebszustände und Parametrisierung der Eigenschaft in der Aktiven Funktionsbeschreibung

	BZ0 / AUS	BZ1 / Belüftung Zone 1	BZ2 / Belüftung Zonen 1+2
Zustandsmerker	$\Delta p < 750 \text{ Pa}$	$750 \text{ Pa} < \Delta p < 1120 \text{ Pa}$	$\Delta p > 1120 \text{ Pa}$
Zeitprogramm	!ZP	ZP	Keine Spezifikation

Damit wurde die Funktion der Betriebszeit der Lüftungsanlage mit den Mitteln der Aktiven Funktionsbeschreibung spezifiziert.

6.2.3.3 Auswertung des Zustandsraums

Da für die Betriebszeit direkt eine Betriebsregel definiert ist, wird keine Betriebsabweichung berechnet. Die Betriebsregel BR ist gültig, wenn die definierte Eigenschaft gültig ist. Abbildung 74 zeigt die Betriebszustände und die Auswertung der Betriebsregel.

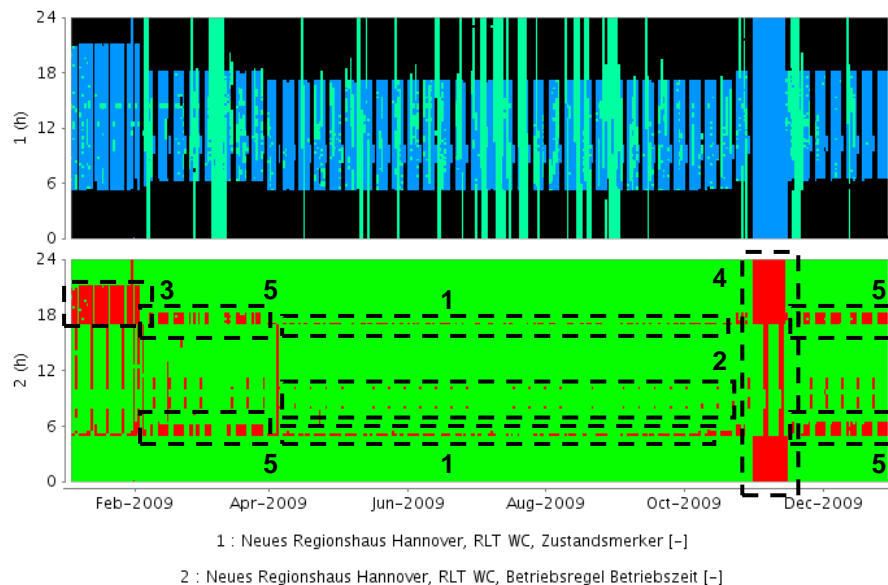


Abbildung 74 oben: Viertelstündliche Betriebszustände für die Lüftungsanlage in einem Jahr (schwarz: BZ0/Aus, blau: BZ1/Zone 1, grün: BZ2/Zone 1+2) unten: Betriebsregel BR_i (grün=gültig; rot=ungültig)

Es ist zu erkennen, dass zu verschiedenen Zeitpunkten Fehler vorlagen. Zum einen werden Fehler im Bereich der Transitionen, also beim Ein- und Ausschalten der Anlage entsprechend dem Zeitprogramm, an den Werktagen (1) und an Wochenenden (2) angezeigt. Diese können durch Abweichungen zwischen angenommener Spezifikation und Betrieb sowie durch geringfügige Abweichungen zwischen den Zeitpunkten der zu Grunde liegenden Messungen entstehen. Da die Fehler hier nur zu Zeitpunkten von Zustandswechseln auftreten, werden sie entsprechend Abschnitt 5.4 als systembedingt bewertet.

Die Fehler (3) und (4) sind hingegen klassische Dauerläufer. Hier sollte die Anlage nachts abgeschaltet oder, falls entsprechend manuell eingeschaltet, in BZ2 laufen. Die Anlage lief jedoch in BZ1. Ursache ist vermutlich eine zweitweise Veränderung des Zeitprogramms durch das Betriebspersonal. Beide Fehler sind qualitätsbedingt.

Fehler (5) hängt vermutlich mit den Zeitumstellungen Ende März und Ende Oktober zusammen. Ursache kann sein, dass der übergebene Zeitstempel der Betriebsdaten ganzjährig in der Winterzeit durchläuft, während die Anlage tatsächlich auf Sommerzeit umschaltet und so im Sommer eine Stunde früher einschaltet. Die korrekte Übergabe der Daten ist Leistung des MSR-Errichters, der Fehler also qualitätsbedingt.

Die Auswertung des gesamten Zustandsraums entspricht der Auswertung des jeweils gültigen Betriebszustands.

In Abbildung 75 sind die Werte für die Betriebsgüte für die verschiedenen Zeitspannen für das Jahr 2009 chronologisch und als sortierte Menge von Werten dargestellt.

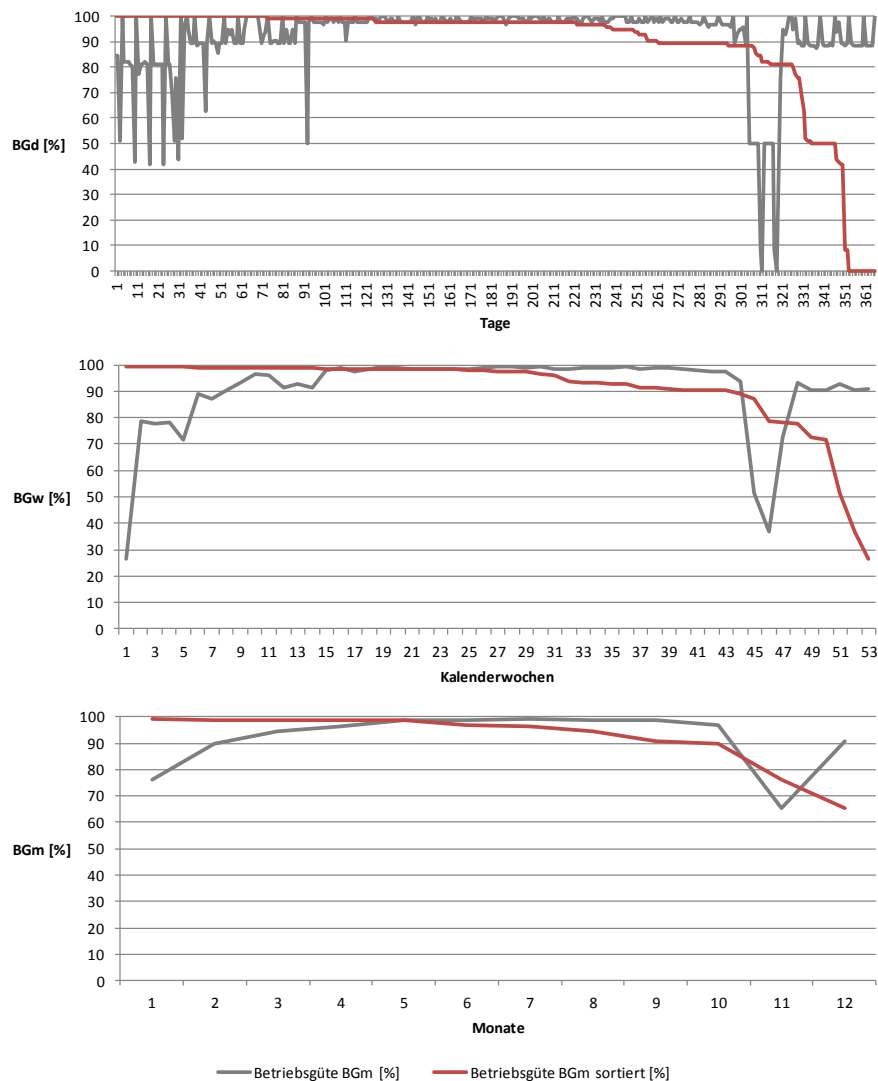


Abbildung 75 Betriebsgüten BG_d , BG_s , BG_m für das Jahr 2009, chronologisch und sortiert

In Tabelle 23 sind ergänzend die Werte für Vierteljahre und das gesamte Jahr 2009 dargestellt.

Tabelle 23 Betriebsgüte für die Vierteljahre und des gesamten Jahr 2009

	Q1	Q2	Q3	Q4	2009
BG_q ; BG_y	87%	98%	99%	85%	92%

Die Betriebsgüte in den Zeiträumen mit ausschließlich systembedingten Fehlern, wie zum Beispiel in den gesamten Sommermonaten, liegt in allen ausgewerteten zeitlichen Aggregationen bei annähernd 100%. Die qualitätsbedingten Fehler auf Grund der Zeitumstellung führen zu Werten von rund 90%, die Dauerläufer zu einem starken Abfall teilweise deutlich unter 80%. Die Anforderungen an die Betriebsgüte können entsprechend hoch festgelegt werden. In Tabelle 24 wird eine einheitliche Betriebsgüte von 95% vorgeschlagen.

Tabelle 24 Grenzwerte für die Betriebsgüte des Zustandsraums

Betriebsgüte für Zeitspannen	Grenzwert
$BG_{day}(ZP)$	95%
$BG_{week}(ZP)$	95%
$BG_{month}(ZP)$	95%
$BG_{quarter}(ZP)$	95%
$BG_{year}(ZP)$	95%

Die Analyse zeigt, dass die für den Energieverbrauch von Lüftungsanlagen bedeutsame Betriebszeit mit der Aktiven Funktionsbeschreibung präzise spezifiziert und überprüft werden kann.

Das Problem der Häufigkeit der Zustandswechsel, dass auch schon bei der witterungsgeführte Vorlauftemperatur in Abschnitt 6.1.4.3 angesprochen wurde, spielt hier eine größere Rolle, da Lüftungsanlagen durchaus häufiger als in diesem Beispiel sinnvoll ein- und ausgeschaltet werden können. Allerdings ist die systembedingte Transition hier auch deutlich kürzer, da sie nicht fehlerhafte Betriebszeiten, sondern lediglich geringe zeitliche Verschiebungen zwischen Spezifikation und Messzeitpunkt des Zu- und Abschaltens der Anlage betrifft. Falls eine solche Spezifikation vorliegt, könnte die Aktive Funktionsbeschreibung in diesem Fall mit Betriebsdaten in kürzeren Zeitschritten von z.B. einer Minute arbeiten. Die Prüfung dieses Falls ist Teil des weiteren Forschungsbedarfs für die Entwicklung von Qualitätsstandards von Anlagen.

6.2.4 Regelung der Ablufttemperatur

Die Lüftungsanlage ist mit einer Kaskadenregelung ausgestattet. Sie regelt die Ablufttemperatur indirekt durch die Konditionierung der Zulufttemperatur. Die Ablufttemperatur entspricht dabei in etwa der Raumlufttemperatur, der Temperatursensor ist in der betrachteten Anlage jedoch im Abluftkanal nahe dem Zentralgerät installiert.

6.2.4.1 Analyse der konventionellen Funktionsbeschreibung

Die Spezifikation der Kaskadenregelung in der konventionellen Funktionsbeschreibung siehe Abbildung 76 (2.3.10 und 2.3.11), hier als „Ablufttemperaturregelung“ bezeichnet, wird in den folgenden Abschnitten analysiert.

1 2.3.10 Ablufttemperaturregelung

Die Außenluft wird in 3 Stufen erhitzt. Als erste Stufe dient der Kreuzstrom-Wärmeübertrager (WRG), der einen Wärmeanteil der Abluft an die Außenluft überträgt. Als zweite Stufe dient ein Vorerhitzerregister, welches mit dem Kältemittel R407c arbeitet und seine Wärme aus der Abwärme der Kälteerzeugung für die EDV-Räume bezieht. Die dritte Stufe wird mit dem Erhitzerregister realisiert, welches mit PWW arbeitet und von einer eigenen Gruppe am Heizungsverteiler (RLT Zubringer) gespeist wird.

5 Um die Raumtemperatur (= Ablufttemperatur) auf den Sollwert auszuregulieren, wird die Ablufttemperatur mit dem Sollwert verglichen. Das Stellsignal wirkt auf das Vorerhitzer- bzw. Nacherhitzerventil. Der Zulufttemperaturfühler erfasst die Zulufttemperatur, um die Stellsignale des Vorerhitzer- bzw. Nacherhitzerventils bei einer Grenzwertüberschreitung zu beeinflussen. Diese werden in Sequenz ab einer Totzone x_{dz} geregelt. Im Bereich der Totzone findet die Zulufttemperaturregelung über die oben beschriebene Wärmerückgewinnung statt.

15 2.3.11 Führen des Raumtemperatur-Sollwertes nach der Außentemperatur (Winterkompensation)

Im Winterbetrieb wird die Raumtemperatur ab einer Außentemperatur von $t_{AU} = 0^{\circ}\text{C}$ um maximal $\Delta t_{\text{Raum,W.Komp.}} = 2\text{K}$ stetig erhöht, um den Einfluss von Raumschließungsflächen mit tieferen Oberflächentemperaturen auf die Behaglichkeit auszugleichen.

Abbildung 76 Konventionelle Funktionsbeschreibung der Lüftungsanlage²⁴⁸

Der erste Abschnitt des Textes (Zeilen 1-7) beschreibt in einer Mischung aus Anlagenaufbau und Funktion die Sequenz der Luftbehandlungsstufen. Festgelegt wird nur die funktionale Reihenfolge der Register. Nähere Angaben zur Sequenz werden nicht gemacht.

Im zweiten Abschnitt (8-13) wird die Regelung mit Führungs- und Folgeregler beschrieben. Eine genaue Beschreibung, ob eine Raum- oder die Ablufttemperatur als Führungsgröße zu verwenden ist und welcher Sensor dies genau ist, liegt nicht vor.

Anschließend (14-18) wird eine Winterkompensation definiert. Hier wird nur noch auf die Raumtemperatur als Führungsgröße Bezug genommen. Die Beschreibung umfasst zwar auch eine Parametrierung der Kennlinie für den Sollwert der Raumlufttemperatur (farblich hervorgehoben). Diese ist jedoch mathematisch nicht eindeutig, da die Steigung der Kennlinie nicht exakt angegeben wird.

In Abschnitt 2.3.16 werden dann einige einstellbare Sollwerte der Anlage mit initial eingestellten Werten aufgeführt, Abbildung 77.

2.3.16 Einstellbare Sollwerte

Beschreibung	Eingestellte Werte	Anderung	Anderung
Min. Zulufttemperatur	18,0 °C		
Max. Zulufttemperatur	40,0 °C		
Ablufttemperatur	20,0 °C		

Abbildung 77 Einstellbare Sollwerte der Anlage²⁴⁹

Die Beschreibung umfasst keine Adressierung, so dass ein eindeutiger Abgleich mit der Gebäudeautomation nicht möglich ist. Bemerkenswert mit Blick auf die Aktive Funktionsbeschreibung ist, dass in der Liste der einstellbaren Sollwerte bereits Felder für Änderungen vorgesehen sind. Der Prozess der Betriebsoptimierung wurde zumindest angedacht.

6.2.4.2 Spezifikation des Zustandsraums

Es werden die gleichen drei Betriebszustände wie für die Betriebszeit spezifiziert. Die Differenzierung der Betriebszustände 1 und 2 ist in diesem Fall jedoch nicht notwendig, da es keine unterschiedlichen Spezifikationen für die Ablufttemperatur gibt. Sie werden aber mit Blick auf die weiteren Auswertungen der Anlage definiert.

Der Zustandsmerker wird auf Basis des Gesamtdrucks der Abluft ebenfalls wie in Abschnitt 6.2.2 gebildet.

Die Betriebsregel für die *Ablufttemperatur* wird definiert mit Hilfe einer Kennlinie $C_{\vartheta_{ABL}}$ entsprechend der Vorgaben der konventionellen Funktionsbeschreibung dargestellt. Bei der Spezifikation ist zu beachten, dass in der Anlage mit Ausnahme des Kreuzstromwärmetauschers keine Funktion zur Kühlung der Luft vorgesehen ist. Auf Grund interner oder externer thermischer Lasten kann sich also die Raum- bzw. Ablufttemperatur über den Sollwert der Kennlinie erhöhen, ohne dass die Anlage dem jederzeit aktiv entgegen wirken kann. Die spezifizierte Ablufttemperatur ist also als Mindesttemperatur anzusehen, die von der Anlage gewährleistet werden muss. Um Regelabweichungen zu berücksichtigen, wird die Mindestanforderung 1K niedriger als in der ursprünglichen Funktionsbeschreibung dargestellt spezifiziert, Abbildung 78.

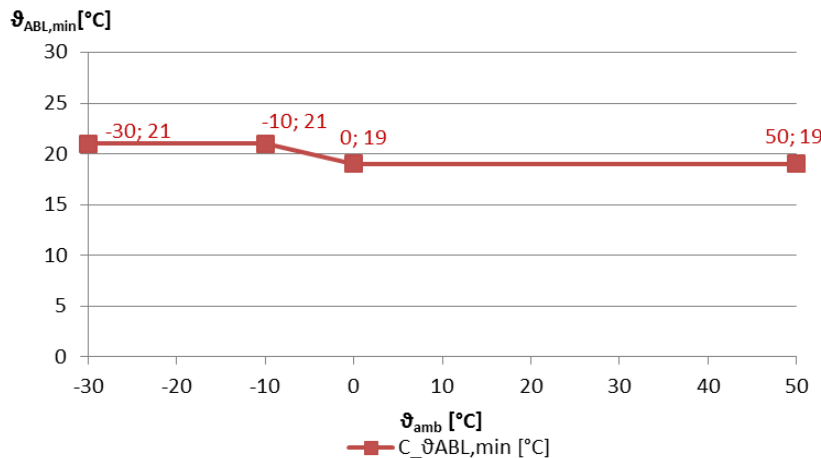


Abbildung 78 Stützpunkte der Kennlinie Mindest-Ablufttemperatur

Die Betriebsregel wird entsprechend nach Gleichung 17 definiert.

Gleichung 17 $\vartheta_{ABL,ist,t} \geq \vartheta_{ABL,min,t}$

Aus den spezifizierten Betriebszuständen wird ein Zustandsraum mit der Betriebsregel *Ablufttemperatur* entsprechend Tabelle 25 definiert.

Tabelle 25 Betriebszustände und Parametrisierung der Betriebsregel in der Aktiven Funktionsbeschreibung

	BZ0 / AUS	BZ1 / Belüftung Zone 1	BZ2 / Belüftung Zone 1+2
Zustandsmerker	$\Delta p < 750 \text{ Pa}$	$750 \text{ Pa} < \Delta p < 1120 \text{ Pa}$	$\Delta p > 1120 \text{ Pa}$
Ablufttemperatur	Keine Spezifikation	$\vartheta_{ABL,Ist,t} \geq \vartheta_{ABL,min,t}$	$\vartheta_{ABL,Ist,t} \geq \vartheta_{ABL,min,t}$

Damit liegt eine aktive Funktionsbeschreibung für die Ablufttemperatur vor. Für eine Lüftungsanlage mit Heiz- und Kühlfunktion kann die Ablufttemperatur auch als Sollwert spezifiziert werden.

In der Praxis könnte die Mindestanforderung ohne Begrenzung nach oben dazu führen, dass die Temperaturen vom Errichter der Anlage auf Kosten des Energieverbrauchs „sicherheitshalber“ überhöht werden. Dem könnte durch eine weitere Spezifikation entgegengewirkt werden, die den Betrieb des Heizregisters auf einen bestimmten Temperaturbereich der Ablufttemperatur begrenzt. Dadurch würden erhöhte Ablufttemperaturen, z.B. auf Grund erhöhten interner Lasten, nicht als Fehler bewertet. Ein erhöhter Energieverbrauch durch übermäßiges Heizen würde jedoch ausgeschlossen.

6.2.4.3 Auswertung des Zustandsraums

Im nächsten Schritt wird nun dargestellt, dass mit der Spezifikation auch eine automatische Bewertung der Betriebsdaten möglich ist. Für die folgenden Analysen werden Datensätze des Jahres 2009 mit jeweils 35040 Einzelwerten je Datenpunkt verwendet. Da die Ablufttemperatur mit dem einzuhaltenden Grenzwert direkt als Regel spezifiziert wurde, ist eine Bestimmung der Betriebsabweichung nicht erforderlich.

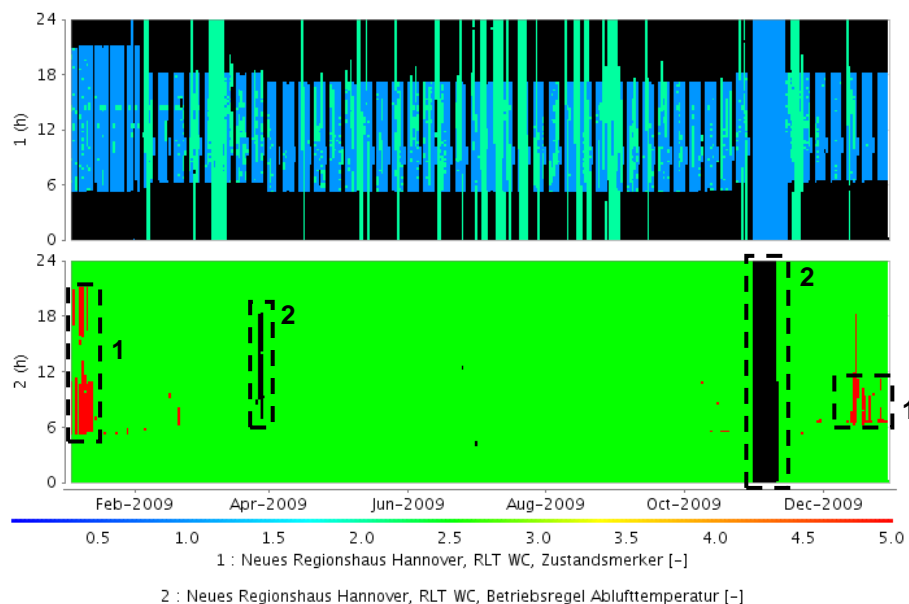


Abbildung 79 oben: Viertelstündliche Betriebszustände für die Lüftungsanlage (schwarz: BZ0/Aus, blau: BZ 1/Zone 1, grün: BZ 2/Zone 1+2)
unten: Betriebsregel BR_t , (grün=gültig; rot und schwarz=ungültig)

Unterschreitungen sind lediglich an wenigen Zeitpunkten in den Wintermonaten erkennbar (1). Ursache ist möglicherweise, dass die Raumlufttemperaturen außerhalb der Nutzungszeiten auf ein Niveau unterhalb des Sollwerts für die Ablufttemperaturen gefallen sind. Mit dem Beginn des Betriebs der Lüftungsanlage muss die Raumluft entsprechend zunächst erwärmt werden. Dieser Effekt würde als systembedingter Fehler gewertet. Möglich ist aber auch, dass hier die Regelung zu einer geringfügigen Unterschreitung führt. In diesem Fall wäre es ein qualitätsbedingter Fehler. Eine eindeutige Zuordnung ist nicht möglich.

Die schwarz dargestellten Werte entstehen auf Grund fehlender oder fehlerhafter Daten bei der Berechnung in der Aktiven Funktionsbeschreibung. Die Betriebsregel ist hier ebenfalls ungültig, die Fehler sind qualitätsbedingt.

Die Auswertung des gesamten Zustandsraums entspricht der Auswertung des jeweils gültigen Betriebszustands.

Mit entsprechender Berechnung sind in Abbildung 80 die Werte für die Betriebsgüte für die verschiedenen Zeitspannen für das Jahr 2009 chronologisch und als sortierte Menge von Werten dargestellt.

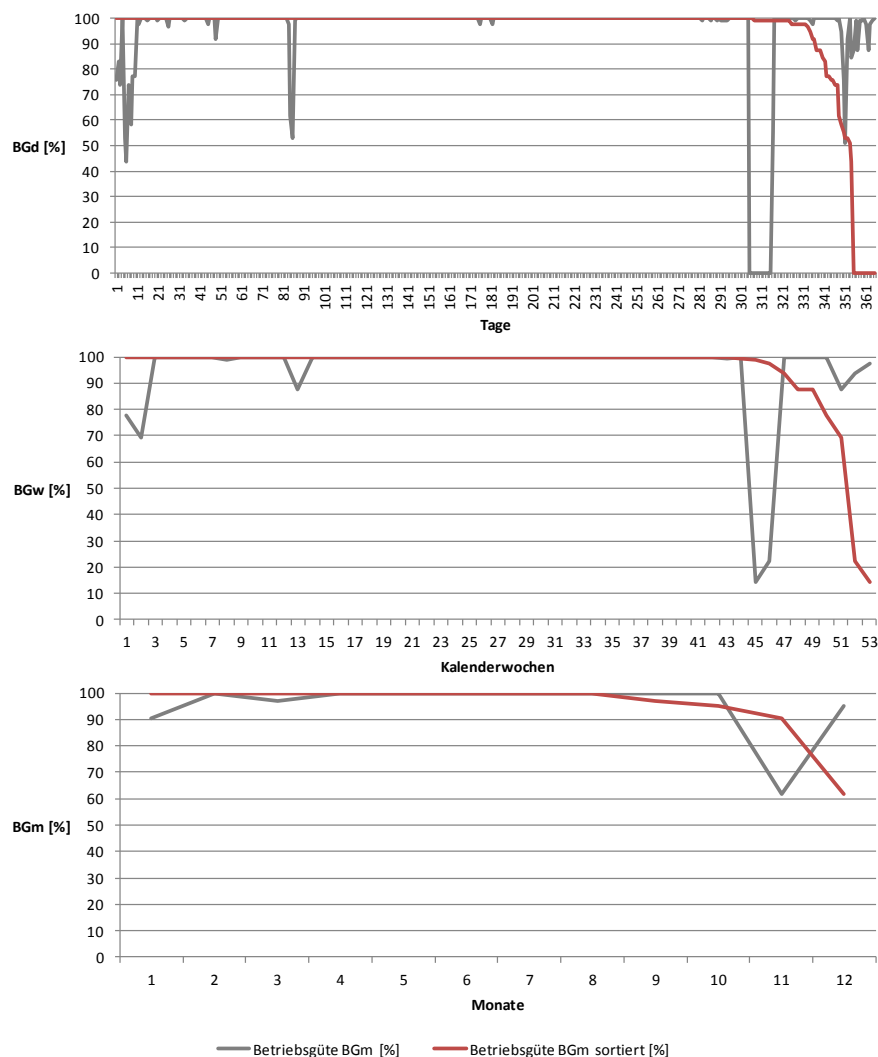


Abbildung 80 Betriebsgüten BG_d, BG_w, BG_m für das Jahr 2009, chronologisch und sortiert

In Tabelle 23 sind ergänzend die Werte für Vierteljahre und das gesamte Jahr 2009 dargestellt.

Tabelle 26 Betriebsgüte für die Vierteljahre und des gesamten Jahr 2009

	Q1	Q2	Q3	Q4	2009
BG _q ; BG _y	96%	100%	100%	86%	95%

Die Betriebsgüte liegt fast durchgehend bei annähernd 100%. Ausnahmen bilden die qualitätsbedingten Fehler, die in den kürzeren Zeitspannen jeweils zu Betriebsgüten von unter 70% führen. In Tabelle 24 wird entsprechend eine einheitliche Betriebsgüte von 95% vorgeschlagen.

Tabelle 27 Grenzwerte für die Betriebsgüte des Zustandsraums

Betriebsgüte für Zeitspannen	Grenzwert
BG _{day} (T_{Abluft})	95%
BG _{week} (T_{Abluft})	95%
BG _{month} (T_{Abluft})	95%
BG _{quarter} (T_{Abluft})	95%
BG _{year} (T_{Abluft})	95%

Die Analyse zeigt, dass mit der Aktiven Funktionsbeschreibung ein präziser Mindestwert für die Ablufttemperatur spezifiziert und überprüft werden kann. Eine Übertragung auf andere Anlagenkonzepte, die auch eine Kühlfunktion enthalten, ist möglich. In diesem Fall kann die Ablufttemperatur dann als Sollwert mit einer Kennlinie spezifiziert und mit einer zulässigen Betriebsabweichung überprüft werden.

6.2.5 Sequenz der Behandlungsstufen

Zur energieeffizienten Regelung der Zu- bzw. Ablufttemperatur sind in Lüftungsanlagen verschiedene Luftbehandlungsstufen installiert. Diese werden üblicherweise in einer Sequenz entsprechend der geforderten Heiz-, Kühl- bzw. Be- oder Entfeuchtungsleistung eingeschaltet. Die korrekte Umsetzung der Sequenz, insbesondere das von gegeneinander wirkenden Luftbehandlungen, ist für den energieeffizienten Betrieb der Lüftungsanlage von Bedeutung. Im folgenden Abschnitt wird hierzu die Sequenz zwischen Heizregister und der Bypassklappe des Wärmetauschers untersucht.

6.2.5.1 Analyse der konventionellen Funktionsbeschreibung

Die Sequenz der Luftbehandlungsstufen wird in Textform beschrieben. Die Spezifikation umfasst zum einen den Text zur Ablufttemperaturregelung, der unter 6.2.4.1 dargestellt ist. Bereits vorab wird die Sequenz im Zusammenhang mit der Regelung der Bypassklappe des Kreuzstromwärmeübertragers beschrieben, siehe Abbildung 81.

1 2.3.9 Regelung/Steuerung des Kreuzstrom -Wärmeübertragers (WRG) mit integrierter Bypass -Klappe

Wird bei Außenlufttemperaturen unterhalb des Gefrierpunktes der Taupunkt der Abluft unterschritten, bildet sich auf der Abluftseite des Wärmeübertragers Eis, welches den Strömungsquerschnitt verengt. Die Abluftseite der WRG wird deshalb durch einen Differenzdruckwächter überwacht. Der Vereisungsschutz wird dadurch gewährleistet, dass die Bypassklappe geöffnet wird, sobald der Differenzdruck auf der Abluftseite des Kreuzstrom -Wärmeübertragers einen bestimmten Grenzwert überschreitet. Übersteigt der Differenzdruck den Grenzwert, generiert die DDC -Regelung eine Störmeldung, zeigt diese an und übergibt sie an die GLT. Die Anlage läuft weiter.

Der Kreuzstrom -Wärmeübertrager soll sowohl im Heiz - als auch im Kühlfall genutzt werden. Über das analoge Stellsignal des Bypassklappenantriebes wird die Zuluft im Heizfall zunächst bis zu einer Mindest-Zulufttemperatur von $t_{zu,WRG,H,min} \leq 22^{\circ}\text{C}$ oder mehr erhitzt, ohne den Erhitzer in Betrieb nehmen zu müssen. Im Kühlfall wird die WRG freigegeben, wenn die Außenlufttemperatur über $t_{au,WRG,K,max}$ über der Ablufttemperatur liegt, um eine Vorkühlung der Außenluft zu erreichen.

Der Wärmeübertrager wird im Bypass umfahren, wenn aus den WC -Bereichen eine Kühllast abzufahren ist und dies mit reiner Außenluft geschehen kann. Voraussetzung ist, dass die Außenlufttemperatur oberhalb der zulässigen Mindest -Einblastemperatur liegt.

Abbildung 81 Konventionelle Funktionsbeschreibung der Sequenz²⁵⁰

Etwas umständlich (Zeile 10: „bis zu einer Mindest-Zulufttemperatur [...] oder mehr“) wird dargestellt, dass bei Bedarf von Heizleistung zur Lufterwärmung zunächst die Bypass-Klappe vollständig geschossen wird, um die gesamte Außenluft über den Wärmeübertrager zu lenken. Dann erst wird der Erhitzer, ein Heizregister im Lüftungsgerät, in Betrieb genommen. Die Spezifikationen für die Frostschutzregelung (2-8) ist für die betrachtete Sequenz unerheblich und wird nicht untersucht.

6.2.5.2 Spezifikation des Zustandsraums

Es werden die gleichen Betriebszustände spezifiziert wie in Abschnitt 6.2.2:

BZ0/AUS (kein Anlagenbetrieb)

BZ1/Belüftung Zone 1

BZ2/Belüftung Zone 1+2.

Die Differenzierung der Betriebszustände 1 und 2 wäre auch in diesem Fall jedoch nicht notwendig.

Es wird der gleiche Zustandsmerker wie in Abschnitt 6.2.2 verwendet.

Als Eigenschaften können einzelne Regelgrößen der Sequenz wie z.B. die Ventilstellungen in der Aktiven Funktionsbeschreibung nicht sinnvoll beschrieben werden, da diese dem dynamischen Verhalten des Regelkreises unterliegen. Die Sequenz kann jedoch durch logische Regeln spezifiziert werden. Erhitzer und Wärmerückgewinnung sollen in Sequenz geregelt werden, das heißt, der Erhitzer soll im Heizfall erst eingeschaltet werden, wenn die Leistung des Kreuzstromwärmeübertragers vollständig genutzt wird, also die Bypassklappe geschlossen ist. Im Umkehrschluss bedeutet dies: wenn der Erhitzer läuft, muss die Bypass-Klappe vollständig geschlossen sein. Diese Betriebsregel kann als Eigenschaft für die Betriebszustände eindeutig spezifiziert werden.

Da in den Betriebsdaten keine Betriebsmeldung für die Registerpumpe vorliegt, wird der Volumenstrom \dot{V} im Heizregister als Indikator für deren Betrieb nach Gleichung 18 verwendet.

Gleichung 18 IF $\dot{V} > 0$ THEN Erhitzerpumpe = EIN ELSE Erhitzerpumpe = AUS

mit \dot{V} Volumenstrom im Heizregister [m^3/h]

Aus den spezifizierten Betriebszuständen und Eigenschaften wird ein Zustandsraum mit der Eigenschaft *Sequenz* entsprechend Tabelle 28 definiert.

Tabelle 28 Betriebszustände und Parametrisierung der Eigenschaft in der Aktiven Funktionsbeschreibung

	0 / AUS	1 / Belüftung Zone 1	2 / Belüftung Zone 1+2
Zustandsmerker	$\Delta p < 750 \text{ Pa}$	$750 \text{ Pa} < \Delta p < 1120 \text{ Pa}$	$\Delta p > 1120 \text{ Pa}$
Sequenz	Keine Spezifikation	$\dot{V} > 0$ implies (Bypassklappe =geschlossen)	$\dot{V} > 0$ implies (Bypassklappe =geschlossen)

Damit ist der hier untersuchte Teil der Sequenz für das Heizregister und die Bypassklappe mit der Aktiven Funktionsbeschreibung spezifiziert.

6.2.5.3 Auswertung des Zustandsraums

Für die folgenden Analysen werden Datensätze des Jahres 2009 mit jeweils 35.040 Einzelwerten je Datenpunkt verwendet.

Da die Sequenz der Behandlungsstufen direkt als Betriebsregel definiert ist, wird keine Betriebsabweichung berechnet. Die Betriebsregel BR ist gültig, wenn die definierte Eigenschaft gültig ist. Abbildung 82 zeigt die Betriebszustände im Jahr 2009 und das Ergebnis der Betriebsregel für die Eigenschaft *Sequenz*.

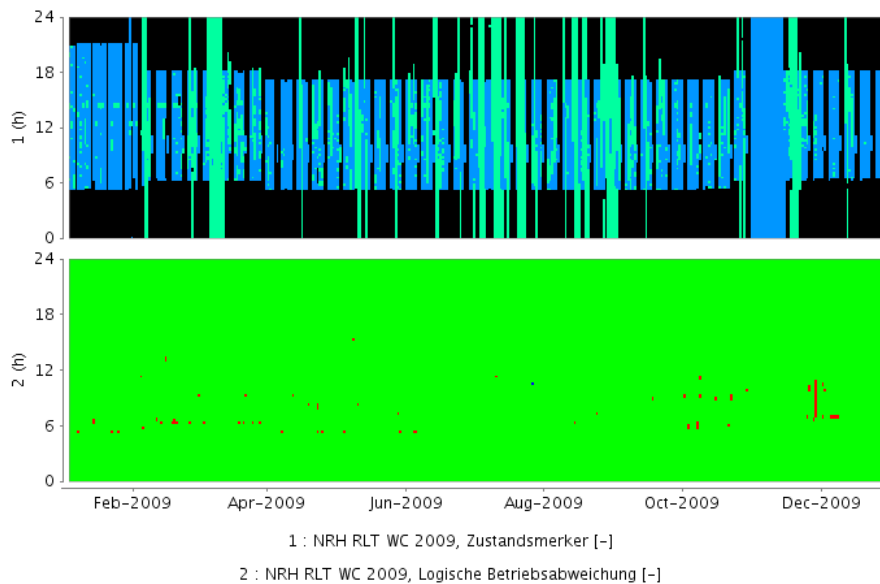


Abbildung 82 oben: Viertelstündliche Betriebszustände für die Lüftungsanlage in einem Jahr
(schwarz: BZ0/Aus, blau: BZ 1/Zone 1, grün: BZ 2/Zone 1+2)
unten: Logische Betriebsabweichung $BA_{t,b}$ (grün=gültig; rot=ungültig)

Es sind nur wenige Fehler erkennbar. Diese treten zumeist auf, wenn die Anlage gegen 6 Uhr Werktags oder 8 Uhr an Samstagen in Betrieb geht. Eine mögliche Ursache ist, dass die Lüftungsanlage bei der Inbetriebnahme zunächst für einige Minuten einen Anfahrbetrieb durchfährt, in dem die Funktion des Heizregisters als Frostschutz sichergestellt wird. In diesen Zeiten ist die Sequenz möglicherweise nicht aktiv. Entsprechend sind die Fehler hier systembedingt. Für eine präzise Differenzierung könnte der Anfahrbetrieb alternativ auch als eigener Betriebszustand definiert werden.

Die Auswertung des gesamten Zustandsraums entspricht der Auswertung des jeweils gültigen Betriebszustands.

Mit entsprechender Berechnung sind in Abbildung 83 die Werte für die Betriebsgüte für die verschiedenen Zeitspannen für das Jahr 2009 chronologisch und als sortierte Menge von Werten dargestellt.

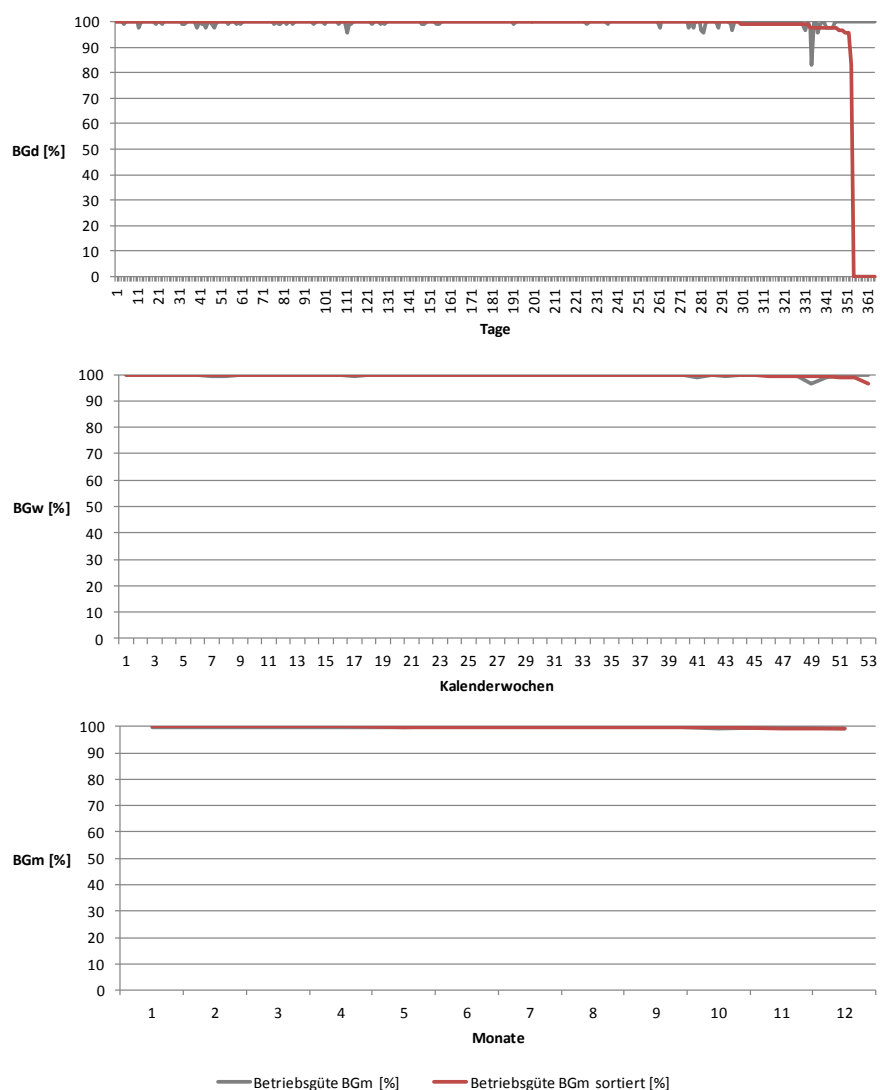


Abbildung 83 Betriebsgüten BG_d , BG_s , BG_m für das Jahr 2009, chronologisch und sortiert

In Tabelle 29 sind ergänzend die Werte für Vierteljahre und das gesamte Jahr 2009 dargestellt.

Tabelle 29 Betriebsgüte für die Vierteljahre und des gesamten Jahr 2009

	Q1	Q2	Q3	Q4	2009
$BG_q; BG_y$	100%	100%	100%	100%	100%

Die Betriebsgüte liegt fast durchgehend bei annähernd 100 %. Die oben dargestellten unregelmäßig auftretenden Fehler sind systembedingt, so dass der Mindestwert für die Betriebsgüte bei den kürzeren Zeiträumen auf 95%, bei quartals- oder jahresweisen Betrachtungen auch auf 100% festgelegt werden kann (die wenigen Fehler entfallen durch Rundung). Tabelle 30 zeigt die entsprechenden Werte.

Tabelle 30 Grenzwerte für die Betriebsgüte des Zustandsraums

Betriebsgüte für Zeitspannen	Grenzwert
$BG_{day}(Sequenz)$	95%
$BG_{week}(Sequenz)$	95%
$BG_{month}(Sequenz)$	95%
$BG_{quarter}(Sequenz)$	100%
$BG_{year}(Sequenz)$	100%

Die Analyse zeigt, dass die Sequenz der betrachteten Behandlungsstufen mit der Aktiven Funktionsbeschreibung präzise spezifiziert und überprüft werden kann. Eine Übertragung auf andere Anlagenkonzepte ist möglich. Möglicherweise sind dort jedoch nur niedrigere Betriebsgüten erreichbar.

6.2.6 Die Lüftungsanlage als komplexer Zustandsraum

In den vorangegangenen Abschnitten wurde jeweils eine einzelne funktionale Eigenschaft der Anlage in einem Zustandsraum spezifiziert. In diesem Abschnitt werden diese Eigenschaften nun gemeinsam in einem Zustandsraum definiert. Auch für die Lüftungsanlage wird gezeigt, dass komplexe funktionale Zusammenhänge mit der Aktiven Funktionsbeschreibung spezifiziert und automatisch überprüft werden können.

Der Zustandsraum wird mit den drei bereits oben definierten Zuständen und Eigenschaften spezifiziert, siehe Tabelle 31.

Tabelle 31 Betriebszustände und Parametrisierung der Eigenschaft in der Aktiven Funktionsbeschreibung

	BZ0 / AUS	BZ1 / Belüftung Zone 1	BZ2 / Belüftung Zone 1+2
Zustandsmerker	$\Delta p < 750 \text{ Pa}$	$750 \text{ Pa} < \Delta p < 1120 \text{ Pa}$	$\Delta p > 1120 \text{ Pa}$
Zeit	!ZP	ZP	Keine Spezifikation
Ablufttemperatur	Keine Spezifikation	$\vartheta_{ABL, Ist, t} \geq \vartheta_{ABL, min, t}$	$\vartheta_{ABL, Ist, t} \geq \vartheta_{ABL, min, t}$
Sequenz der Behandlungsstufen	Keine Spezifikation	$\dot{V} > 0$ implies (Bypassklappe =geschlossen)	$\dot{V} > 0$ implies (Bypassklappe =geschlossen)

Der Zustandsraum wird für 31.809 bzw. 91 % der insgesamt 35.040 viertelstündlichen Zeitpunkte im Jahr 2009 als gültig ausgewertet, siehe Abbildung 84.

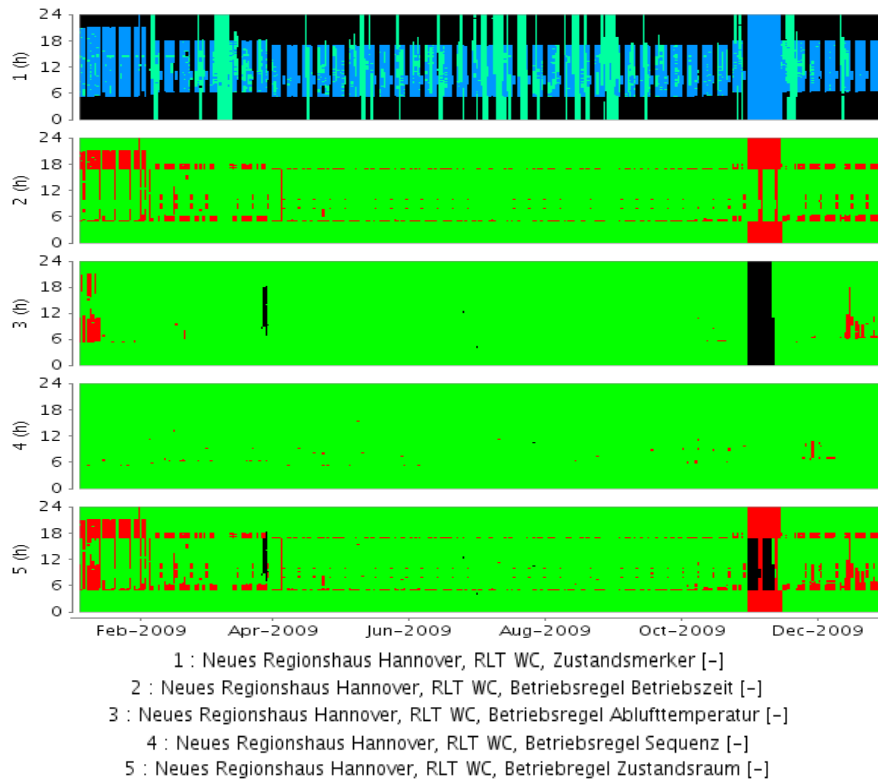


Abbildung 84 Zustandsmerker (1)
 (schwarz: Zustand 0, blau: Zustand 1, grün: Zustand 2)
 Auswertung der Betriebsregeln (2-4) und des Zustandsraum (5)
 grün: gültig, rot und schwarz: ungültig

In Abbildung 85 sind die Werte für die Betriebsgüte für verschiedene Zeitspannen für das Jahr 2009 chronologisch und als sortierte Menge von Werten dargestellt.

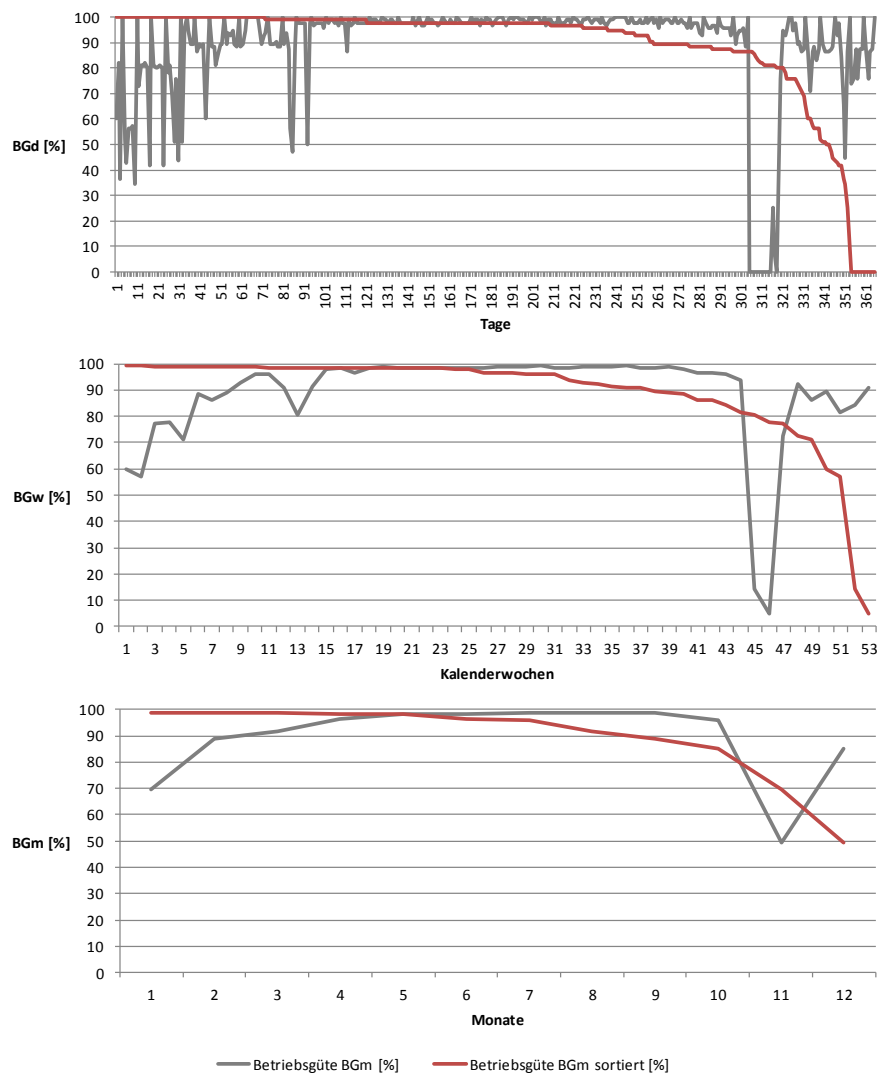


Abbildung 85 Betriebsgüten BG_d , BG_s , BG_m für das Jahr 2009, chronologisch und sortiert

In Tabelle 32 sind ergänzend die Werte für Vierteljahre und das gesamte Jahr 2009 dargestellt.

Tabelle 32 Betriebsgüte für die Vierteljahre und des gesamten Jahr 2009

	Q1	Q2	Q3	Q4	2009
$BG_{quarter}; BG_{year}$	83%	98%	99%	77%	90%

Die Kombination der Funktionen in einem Zustandsraum zeigt, dass eine Betriebsgüte für das Gesamtsystem von mehr als 95% systemtechnisch in allen betrachteten Zeiträumen erreichbar ist. Gleichzeitig liegt die Betriebsgüte in den Zeiten mit nur leicht veränderten Parametern in der Betriebsführung deutlich unter 90%, so dass eine eindeutige Differenzierung und Fehlerindikation möglich ist. Die Prüfergebnisse der Referenzanlage für einen Grenzwert von 90% als Mindestanforderung für die Betriebsgüte der gesamten Anlage ist in Tabelle 33 dargestellt.

Tabelle 33 **Grenzwerte für die Betriebsgüte des Zustandsraums und Anzahl der Zeitspannen im untersuchten Jahr, in dem der Grenzwert eingehalten wurde**

Betriebsgüte für Zeitspannen	Grenzwert	Grenzwert eingehalten an
$BG_{day} (ZR_{Lüftungsanlage})$	90%	276 d/a
$BG_{week} (ZR_{Lüftungsanlage})$	90%	37 Wochen/a
$BG_{month} (ZR_{Lüftungsanlage})$	90%	8 Monate/a
$BG_{quarter} (ZR_{Lüftungsanlage})$	90%	2 Vierteljahre/a
$BG_{year} (ZR_{Lüftungsanlage})$	90%	nicht eingehalten

Mit der Untersuchung dieser Anlage wurde gezeigt, dass die Spezifikation und Bewertung eines komplexeren Zustandsraumes für Lüftungsanlagen mit der Aktiven Funktionsbeschreibung möglich ist.

6.2.7 Fazit zur Lüftungsanlage

Die Referenzanlage Lüftung ist wie der statische Heizkreis ein typisches, in der Praxis häufig verwendetes System. Es wurde gezeigt, dass wesentliche Vorgaben der konventionellen Funktionsbeschreibung mit Hilfe der Aktiven Funktionsbeschreibung spezifiziert werden können. Gleichzeitig konnten mit der gleichen Beschreibung die Betriebsdaten für ein Jahr auf Übereinstimmung mit den Vorgaben überprüft werden. Für alle einzelnen Eigenschaften wurden festgestellt, dass eine Betriebsgüte von 95% bezogen auf verschiedene Zeitspannen möglich ist. Für den Zustandsraum der gesamten Anlagenfunktionalität kann eine Betriebsgüte von 90% als systemtechnisch erreichbares Mindestmaß angenommen werden.

Es wurde damit gezeigt, dass mit der Aktiven Funktionsbeschreibung eine Mindestanforderung an die funktionale Qualität des Betriebs in Bezug auf die Spezifikation definiert und geprüft werden kann. Dieser Standard für die Betriebsgüte kann in der Praxis wie gezeigt sogar noch übertroffen werden.

Neben der hier als Referenz verwendeten Anlage gibt es eine Vielzahl von Lüftungsanlagen in anderen Konfigurationen, z.B. mit anderen Luftbehandlungsstufen und anderen Regelkonzepten. Darüber hinaus können auch andere Gebäudefunktionen wie zum Beispiel im belüfteten Raum installierte Heizkörper oder Umluftkühlgeräte in die Sequenz integriert werden. Es ist naheliegend, für diese Anlagen Bibliotheken von Zustandsräumen mit entsprechenden Daten für die Qualitätsstandards der Funktionen zu entwickeln.

6.3 Oberflächennahe Geothermieranlage

Anlagen zur Nutzung von oberflächennaher Geothermie mittels senkrechter Erdsonden sind in den letzten Jahren vermehrt in Nichtwohngebäuden zur Anwendung gekommen. Zum Heizen nutzen sie das Erdreich als Wärmequelle in Verbindung mit einer Wärmepumpe und thermisch aktivierten Bauteilen. Der Kühlbetrieb kann als „freie Kühlung“ durch Wasser erfolgen, das in einem Kreislauf zwischen Erdsonden und den thermisch aktivierten Bauteilen gepumpt wird.

Eine Spezifikation dieser Anlagen mit Aktiven Funktionsbeschreibungen ist besonders naheliegend, da sie in der Planung häufig frühzeitig mit verschiedenen, klar getrennten Betriebszuständen für den Heiz- und Kühlbetrieb konzipiert werden. Die Feldstudien, die in den letzten Jahren zu diesen Anlagen durchgeführt wurden, zeigen jedoch den Bedarf einer verbesserten Qualitätssicherung im Betrieb²⁵¹.

Für den Heizkreis und die Lüftungsanlage wurden in den vorherigen Abschnitten alle Betriebsregeln einzeln analysiert. Für die Geothermieranlage werden nur zwei Funktionen im Detail untersucht. Der gesamte Zustandsraum umfasst weitere Betriebsregeln, die jedoch an dieser Stelle keine neuen Erkenntnisse bringen und deshalb jeweils nur kurz erläutert, aber nicht im Detail bewertet werden.

6.3.1 Beschreibung der Referenzanlage

Die Referenzanlage zur Nutzung oberflächennaher Geothermie ist die Anlage des EnergieForum Berlin²⁵². Ein Schema der Anlage mit den wesentlichen Komponentengruppen ist in Abbildung 86 dargestellt.

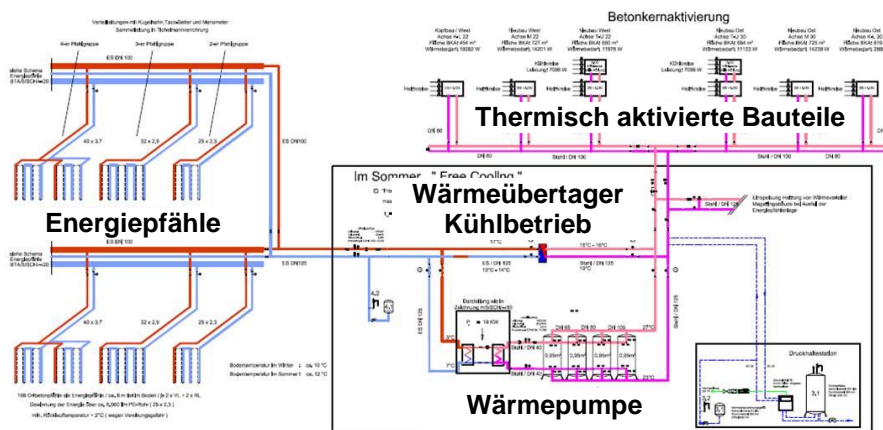


Abbildung 86 Anlagenschema der Geothermieranlage des EnergieForums Berlin²⁵³

Im Heizbetrieb entzieht eine Wärmepumpe dem Gründungsbereich unter dem Gebäude aus 196 Energiepfählen Wärme. Sie erhöht das Temperaturniveau von ca. 6-14°C im Erdreich auf 24-28°C zur Beladung eines Pufferspeichers. Von hier aus wird das Gebäude über ein Rohrregister in den Geschossdecken mit dem erwärmten Wasser beheizt („Betonkernaktivierung“)^{xxxii}. Im Kühlbetrieb wird das Wasser in den Energiepfählen und der Betonkernaktivierung unter Umgehung der Wärmepumpe nur über

^{xxxii} Das Gebäude wird auch über Heizkörper und die Lüftungsanlagen beheizt.

einen Wärmeübertrager getrennt umgewälzt und so Wärme aus dem Gebäude in das Erdreich abgeführt.

Im Folgenden werden zwei der Funktionen der Anlage und ein komplexer Zustandsraum für die Anlage untersucht.

6.3.2 Betriebsdaten

Die verwendeten Betriebsdaten für die Anlage wurden im Forschungsprojekt WKSP²⁵⁴ des IGS erfasst. Die Daten wurden zunächst in der Automationsstation (Fabrikat Honeywell) als Momentanwerte im Abstand von 15 Minuten gespeichert. Diese exportierte die Daten im Dateiformat *txt* in viertelstündliche Dateien. Die Daten wurden anschließend mit der Software ennovatis Controlling²⁵⁵ eingelesen, gespeichert, für die Analysen in dieser Arbeit exportiert und in den Demonstrator des Energie-Navigators importiert. Auch hier wurde mit einem Zeitschritt von 15 Minuten gearbeitet.

Es wurden Daten aus dem Jahr 2009 verwendet. Für den Zeitraum 4.6.-24.6.2009 liegen auf Grund eines technischen Fehlers bei der Datenübergabe keine Daten vor.

6.3.3 Vorlauftemperatur Betonkernaktivierung

Die Vorlauftemperaturregelung der Betonkernaktivierung (BKT) funktioniert in gleicher Weise wie die des Heizkreises. Bei Heiz-/Kühlsystemen mit moderaten Systemtemperaturen kommt der Regelung jedoch eine andere Bedeutung zu, da die Systemtemperaturen näher an den Temperaturniveaus in den versorgten Räumen liegen. Eine Annäherung an die Raumtemperatur kann entsprechend schnell zu einer Wirkungslosigkeit des Systems führen. Gleichzeitig sind diese Systeme in Kombination mit großen Gebäudemassen deutlich träger als Heizkörper.

Da eine Temperaturregelung mit Rücklaufbeimischung bereits am Heizkreis analysiert wurde, wird die nochmalige Analyse dieses Regelprinzips hier genutzt, um zusätzlich den bisher noch nicht berücksichtigten Fehler-typ der unkorrekten Spezifikation nach Abschnitt 5.4 Absatz 2.f darzustellen.

6.3.3.1 Analyse der konventionellen Funktionsbeschreibung

Aufbau und Darstellungsmittel der Funktionsbeschreibung zur Geothermieranlage sind bereits in Abschnitt 3.1.2 dargestellt. Deshalb wird an dieser Stelle nur auf die Beschreibung der Vorlauftemperatur eingegangen. Die konventionelle Funktionsbeschreibung definiert zum einen ein Freigabekriterium für die Umwälzpumpe der Betonkernaktivierung, siehe Abbildung 87. Freigabebedingung für die Umwälzpumpe ist die Unterschreitung eines unteren bzw. Überschreitung eines oberen Grenzwerts für eine gemittelte Außenlufttemperatur (Zeilen 5-6). Die Pumpe soll dann eingeschaltet werden. Für den Kühlfall ist zusätzlich ein Zeitprogramm bzw. eine Intervallschaltung (Zeilen 7-9) vorgesehen. Das Zeitprogramm wird in der Funktionsbeschreibung nicht parametrisiert.

- 1 **Ansteuerung der Betonkernaktivierungspumpe (M1H11_M02) nach erfolgter Freigabe**
Die Steuerung dieser Pumpe befindet sich auf dem Controller 08 und gehört zu der Anlage M1H11_. Allerdings wird die Anforderung in der Anlage M1H12_ ausgewertet und über den C-Bus auf den Controller 08 transportiert!
- 5 Nach erfolgter Freigabe des „Heizbetriebes“ wird die Primärpumpe (M1H11_M02) eingeschaltet sobald die Anforderung aus der Wärmepumpe ansteht und das Zeitprogramm (Intervallbetrieb) EIN ist. Nach erfolgter Freigabe des „Kühlbetriebes“ wird die Primärpumpe eingeschaltet sofern das Zeitprogramm (Intervallbetrieb) EIN ist. Dies geschieht Kühlfall unabhängig von der Anforderung der Wärmepumpe.

Datenpunkt	Klartext	Wert/Einheit
M1H11_M02HK_P_SB0	Betonkernaktivierungs Pumpe M02	EIN
M1H12_M04HK_P_BA0	Anforderung Pumpe M1H11_M02	EIN
M1H12_M01HK_ZP_VB0	Zeitprogramm Intervallbetrieb	EIN

Abbildung 87 Auszug aus der Beschreibung der Vorlauftemperaturregelung in der Funktionsbeschreibung des EnergieForums Berlin / Fa. Honeywell²⁵⁶

Zum anderen wird eine Rücklaufbeimischung zur witterungsgeführten Regelung der Vorlauftemperatur spezifiziert. Die Vorlauftemperatur selbst wird mit Hilfe einer Kennlinie über einer gemittelten Außenlufttemperatur spezifiziert und entspricht damit im Wesentlichen der Regelung im Heizkreis in Abschnitt 6.1.4, siehe Abbildung 88.

- 1 **Freigabe der Betonkernaktivierungspumpe (M02)**
Es werden vor der Freigabe der Pumpe die folgenden Bedingungen geprüft:
- Die Anforderung der Pumpe aus der Anlage M1H12 steht an

Datenpunkt	Klartext	Wert/Einheit
M1H12_M04HK_P_BA1	Anforderung Pumpe von CR09	EIN

Sind diese Bedingungen erfüllt so wird die Pumpe (M02) eingeschaltet.

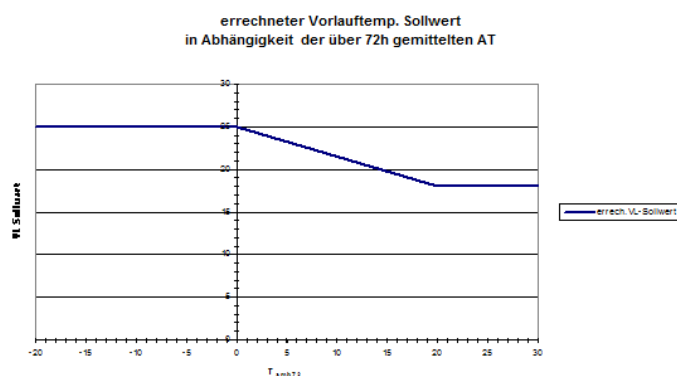
Regelung der Vorlauftemperatur

Die Vorlauftemperatur M1H11_B05HK_VLMW0 wird auf einen errechneten Sollwert durch Verstellen des Dreiwegeventils M1H11_Y10HK_VTST0 geregelt.

- 10 Folgende Bedingung muss zur Freigabe der Regelung erfüllt sein:

- Die Freigabe M1H12_Freigabe muss „EIN“ sein

Der errechnete Vorlauftemperatur Sollwert variiert in Abhängigkeit des über 72h gemittelten Aussentemperaturwertes (siehe Diagramm)



Datenpunkt	Klartext	Wert/Einheit
M1H03_Tamb72	Anzeige der AT (72h Mittel)	°C
M1H11_B04_VLT_RW1	Anzeige des errech. VL Sollwertes	°C

Abbildung 88 Auszug aus der Beschreibung der Vorlauftemperaturregelung in der Funktionsbeschreibung des EnergieForums Berlin / Fa. Honeywell²⁵⁷

6.3.3.2 Spezifikation des Zustandsraums

Für die Geothermieanlage werden drei Betriebszustände entsprechend der Funktion der Betonkernaktivierung definiert:

BZ0 / AUS (die Umwälzpumpe der Betonkernaktivierung ist abgeschaltet),
 BZ1 / Heizbetrieb,
 BZ2 / Kühlbetrieb.

Die Betriebszustände könnten noch weiter differenziert werden, um z.B. im Zustand 1 zusätzlich zwischen Heizbetrieb mit (1.a) gleichzeitig laufender Wärmepumpe und (1.b) abgeschalteter Wärmepumpe zu unterscheiden. Dies ist jedoch für die hier analysierten Funktionen nicht erforderlich.

Der Zustandsmerker wird in Abhängigkeit von der Außenlufttemperatur gebildet. BZ1/Heizbetrieb liegt vor, wenn die über 24 Stunden gemittelte Außenlufttemperatur $\vartheta_{\text{amb},24\text{h}} < 14^\circ\text{C}$ ist, Kühlbetrieb bei $\vartheta_{\text{amb},24\text{h}} > 20^\circ\text{C}$. Dazwischen ist die Anlage in Zustand BZ0/AUS.

Entgegen der Dokumentation wird die Vorlauftemperatur der Betonkernaktivierung im Betrieb ebenfalls als Funktion der über 24 Stunden (nicht 72 Stunden) gemittelten Außenlufttemperatur geführt. Aus den Betriebsdaten für das Jahr 2009 ergibt sich, dass die Kennlinie der Funktionsbeschreibung für die Vorlauftemperatur offensichtlich verändert wurde. Um eine aussagekräftige Analyse zu entwickeln, wurde aus den Daten näherungsweise eine Kennlinie abgeleitet, siehe Abbildung 89.

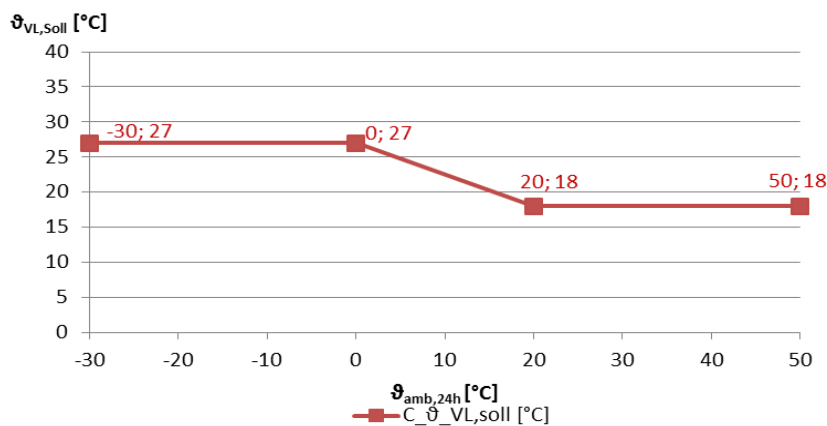


Abbildung 89 Stützpunkte der Kennlinien Vorlauftemperatur BKT

Da die spezifizierte Vorlauftemperatur im Betrieb nicht exakt eingehalten werden kann, werden die Betriebsregeln unter Verwendung einer zulässigen Betriebsabweichung $BA_{\text{TVL},t}$ spezifiziert, siehe Gleichung 19.

$$\text{Gleichung 19} \quad BA_{\vartheta_{\text{VL},t}} = \vartheta_{\text{VL,Ist},t} - \vartheta_{\text{VL,Soll},t}$$

Die Betriebsregeln sind gültig, wenn beide Grenzwerte für die Betriebsabweichung eingehalten werden, siehe Gleichung 20.

$$\text{Gleichung 20} \quad BA_{\vartheta_{\text{VL},t}} > BA_{\text{lim,bot}} \ \&\& \ BA_{\vartheta_{\text{VL},t}} < BA_{\text{lim,top}}$$

Im Kühlbetrieb liegt eine Spezifikation für die Vorlauftemperatur nur vor, wenn auch ein Zeitprogramm gültig ist. Die Gültigkeit des Zeitprogramms ist also Eigenschaft im BZ2/Kühlbetrieb.

An dieser Stelle wird, wie oben bereits erwähnt, der Fehlertypus einer unkorrekten Spezifikation in die Analysen einbezogen. Die Betriebsdaten

in Abbildung 90 zeigen den Betrieb der Betonkernaktivierung im Kühlbetrieb (dargestellt als Linie) von jeweils 00:30 – 01:30, 02:30 – 03:30 usw., siehe Abbildung 90. Als fehlerhafte Spezifikation wird ein um eine halbe Stunde versetztes Zeitprogramm definiert, also 00:00 – 01:00, 02:00 – 03:00 Uhr usw. (blaue dargestellte Balken).

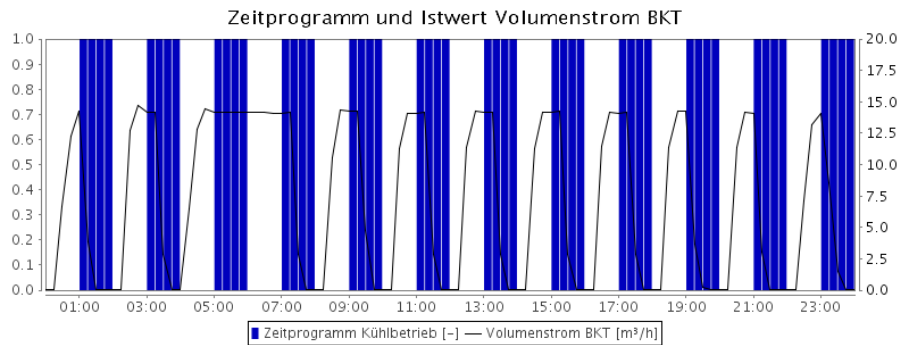


Abbildung 90 Volumenstrom BKT und (fehlerhaftes) Zeitprogramm (blau=EIN)

Das Zeitprogramm für den Kühlfall im Demonstrator des Energie-Navigators ist in Abbildung 91 dargestellt.

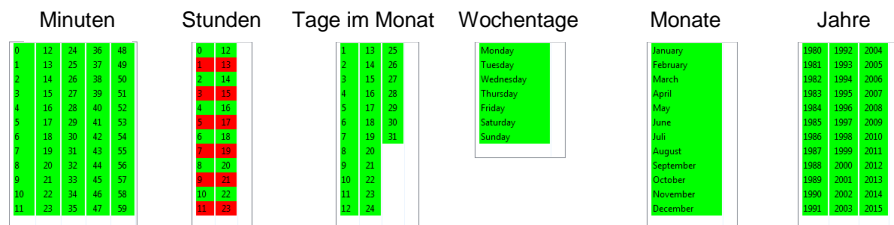


Abbildung 91 Zeitprogramm für die Betonkernaktivierung im Kühlfall

Entsprechend den Vorgaben wird ein Zustandsraum für die Eigenschaft *Vorlauftemperatur BKT* nach Tabelle 34 spezifiziert.

Tabelle 34 Betriebszustände und Parametrisierung der Eigenschaft in der Aktiven Funktionsbeschreibung

	BZ0 / AUS	BZ1 / Heizen	BZ2 / Freecooling
Zustandsmerker	!BZ1 && !BZ2	$\vartheta_{amb,24h} < 14^{\circ}\text{C}$	$\vartheta_{amb,24h} > 20^{\circ}\text{C}$
Vorlauftemperatur BKT $\vartheta_{VL} [^{\circ}\text{C}]$	Keine Spezifikation	$BA_{\vartheta_{VL},normal,t} > BA_{lim,bot}$ && $BA_{\vartheta_{VL},normal,t} < BA_{lim,top}$	ZP implies $BA_{\vartheta_{VL},absenk,t} > BA_{lim,bot}$ && $BA_{\vartheta_{VL},absenk,t} < BA_{lim,top}$

Damit ist die Funktion der zeit- und witterungsgeführten Vorlauftemperatur in den drei Betriebszuständen mit einer Aktiven Funktionsbeschreibung spezifiziert.

6.3.3.3 Auswertung des Zustandsraums

Im nächsten Schritt wird nun dargestellt, dass mit der Spezifikation auch eine Bewertung der Betriebsdaten möglich ist. Es werden Datensätze des Jahres 2009 mit jeweils 35040 Einzelwerten je Datenpunkt verwendet. Die Auswertung erfolgt entsprechend Abschnitt 6.1.4.3 und ist deshalb hier verkürzt dargestellt.

Abbildung 54 zeigt die Betriebszustände und die Betriebsabweichung der Vorlauftemperatur für alle drei Betriebszustände für das Jahr 2009, wobei die Werte für die Betriebsabweichung entsprechend der Farbskala dargestellt sind. Werte für den Zustand AUS, in dem keine Vorgabe für die Vorlauftemperatur spezifiziert ist, sind in schwarz dargestellt.

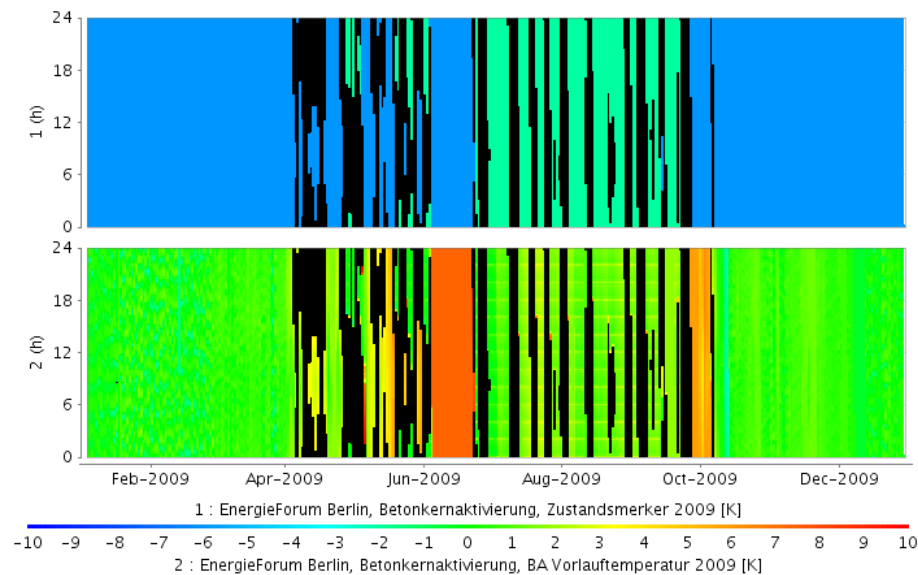


Abbildung 92 oben: Betriebszustände der Betonkernaktivierung (schwarz: BZ0/Aus, blau: BZ 1/Heizbetrieb, grün: BZ 2/Kühlbetrieb) unten: Betriebsabweichung der Vorlauftemperatur (schwarz: Betriebszustand AUS)

Abbildung 93 zeigt die absolute Häufigkeit der einzelnen Werte für die Betriebsabweichung für die 27.629 Zeitpunkte im Jahr 2009, in denen die Anlage in den Betriebszuständen BZ1 oder BZ2 war^{xxxiii}.

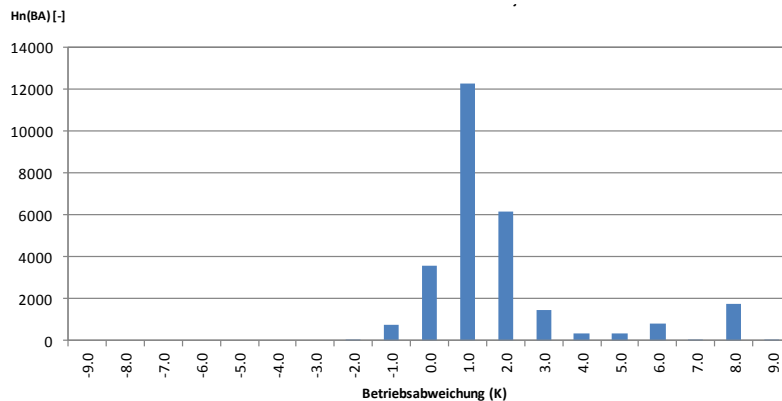


Abbildung 93 Häufigkeit der Betriebsabweichung (BA) bezogen auf die vorhandenen Betriebsdaten in 2009 in den Betriebszuständen 1 oder 2 (n=27.629)^{xxxiv}

Die Häufigkeitsverteilung der Betriebsabweichungen wird zur weiteren Analyse entsprechend der erkennbaren Spitzen in vier Wertegruppen eingeteilt, Tabelle 35.

^{xxxiii} Im Betriebszustand „Aus“ ist die Eigenschaft der Vorlauftemperatur nicht definiert, es liegt also kein Soll-Wert und damit auch kein Wert für die Betriebsabweichung vor.

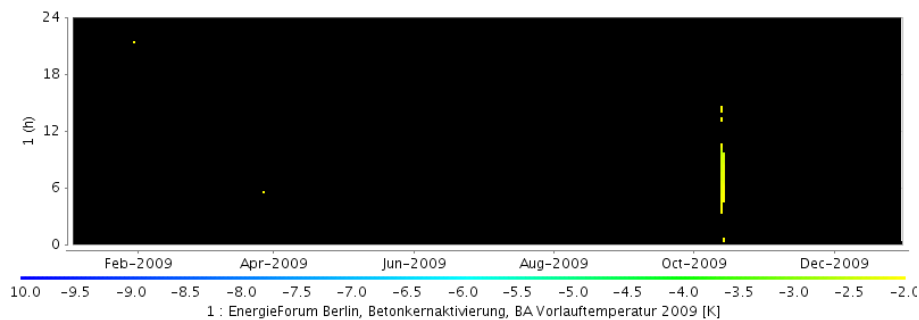
^{xxxiv} Für die Darstellung wurden alle vorliegenden Werte verwendet. Zur besseren Lesbarkeit wurden die Werte im Bereich -9 bis 9°C dargestellt. Die Klassifizierung erfolgte mit einer Klassenbreite von $d_j=1,0K$.

Tabelle 35 Wertebereiche für die Analyse der Betriebsabweichung

1:			BA_t	$< -2K$
2:	-2K	\leq	BA_t	$< 2K$
3:	2K	\leq	BA_t	$< 7K$
4:	7K	\leq	BA_t	$< 10K$

Es sind erhebliche Betriebsabweichungen erkennbar, insbesondere als Überschreitungen der spezifizierten Werte. Zur Bestimmung geeigneter Grenzwerte werden die Betriebsabweichungen analysiert.

Bereich 1 ($BA_t < -1K$), Abbildung 94



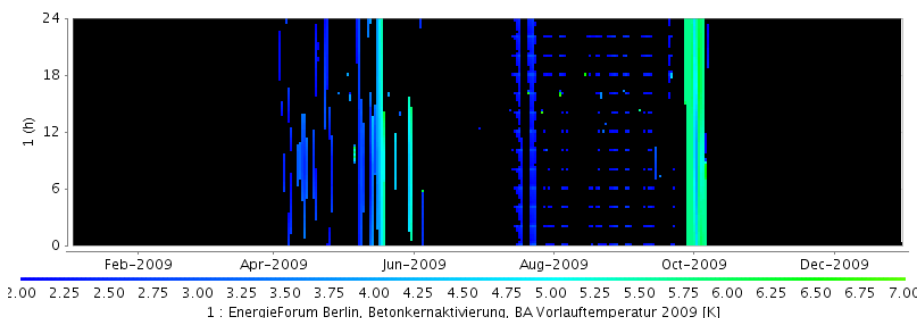
**Abbildung 94 Betriebsabweichung $BA_t < -1K$
(Wertebereich: Farbskala, andere Werte: schwarz)**

Vom 13.-15.10.09 lag die Vorlauftemperatur zeitweise rund 2-3 K zu niedrig. In diesem Zeitraum lag ggf. ein Eingriff in die Automation vor, z.B. durch eine veränderte Betriebsführung. Eine systembedingte Ursache für die Abweichungen ist nicht erkennbar.

Bereich 2 ($-1K \leq BA_t < 1K$)

Die Werte in Bereich zwei entsprechen mit geringen Abweichungen der Spezifikation.

Bereich 3 ($2K \leq BA_t < 7K$), Abbildung 95



**Abbildung 95 Betriebsabweichung $2K \leq BA_t < 7K$
(Wertebereich: Farbskala, andere Werte: schwarz)**

Überhöhte Istwerte im Bereich 3 liegen in den Übergangszeiten und im Sommer vor. Die Fehler im Frühjahr treten zwischen einzelnen Phasen auf, in denen die Anlage abgeschaltet war. Möglich ist hier, dass das Einschaltkriterium der gemittelten Außenlufttemperatur nicht präzise verwendet wurde und die Anlage zu diesen Zeitpunkten abgeschaltet war, obwohl Heizbetrieb spezifiziert war. In der Woche 28.9.-5.10.09 traten ähnliche Abweichungen auf. Auf Grund der klaren zeitlichen Abgrenzung liegt hier

jedoch als Ursache ein Eingriff in die Betriebsführung nahe.

Im Kühlbetrieb, überwiegend im August, werden Betriebsabweichungen zwischen den durch das fehlerhafte Zeitprogramm definierten Betriebsphasen erkannt, da hier im abgeschalteten System die Vorlauftemperatur durch die Umgebungswärme ansteigt, während die Spezifikation die Vorlauftemperatur entsprechend der Kennlinie anfordert.

Beide Fehlertypen sind qualitätsbedingt.

Bereich 4 ($7K \leq BA_t < 10K$), Abbildung 96

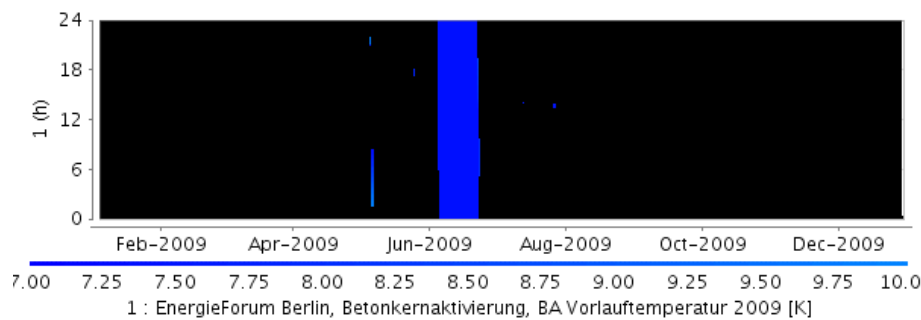


Abbildung 96 Betriebsabweichung $7K \leq BA_t < 10K$
(Wertebereich: Farbskala, andere Werte: schwarz)

In der Zeit vom 5.-22.6.09 liegt ein Fehler in der Datenübergabe vor. Es werden für alle Datenpunkte konstante Werte übergeben. Da das 24h-Mittel der Außenlufttemperatur bei 11,13K liegt, wertet der Zustandsraum den Heizbetrieb aus. Sollwert für die Vorlauftemperatur wäre entsprechend der Kennlinie eine Vorlauftemperatur von 22°C. Übergeben wird ein konstanter Istwert von 29,3°C, so dass eine Betriebsabweichung von 7,3 K berechnet wird. Unabhängig davon, was im Detail Ursache dieser Fehler ist, ist die Abweichung ein qualitätsbedingter Fehler.

Wie schon bei dem oben bearbeiteten Heizkreis, liegt auch bei der Vorlauftemperatur der Betonkernaktivierung der überwiegende Teil der Wert nahe an der spezifizierten Vorlauftemperatur. Tabelle 36 zeigt den Anteil der Werte, die innerhalb verschiedener Grenzen der Betriebsabweichung liegen.

Tabelle 36 Betriebsdaten innerhalb der Grenzwerte

$BA_{t,lim,top}$	+1 K	+2 K	+3 K
$BA_{t,lim,bottom}$	-1 K	-2 K	-3 K
Anzahl der Messzeitpunkte, für die die Betriebsregel im Betrachtungszeitraum spezifiziert ist	27629	27629	27629
Anzahl der Werte innerhalb der Grenzwerte	15841	22709	24236
Anteil der Werte innerhalb der Grenzwerte bezogen auf die Anzahl der Zeitpunkte im Betrachtungszeitraum, für die die Betriebsregel spezifiziert im Betrachtungszeitraum ist	57%	82%	88%
Anzahl aller Messzeitpunkte im Betrachtungszeitraum	35040	35040	35040
Anzahl der Messzeitpunkte, für die die Betriebsregel gültig ist (einschließlich der Zeitpunkte, für die keine Spezifikation vorliegt)	23252	30120	31647
Anteil der Messzeitpunkte, für die die Betriebsregel gültig ist	66%	86%	90%

Für die zulässige Betriebsabweichung werden die gleichen Grenzwerte für die Vorlauftemperatur festgelegt wie im Heizkreis, siehe Gleichung 21.

Gleichung 21 $BA_{t,lim,top} = 2 \text{ K}$ und $BA_{t,lim,bot} = -2 \text{ K}$

Von den untersuchten Betriebsdaten für die Vorlauftemperatur für das Jahr 2009 liegen zu den Zeitpunkten mit Spezifikation 82% innerhalb dieser Grenzen. Abbildung 97 zeigt die Betriebsabweichung und die Gültigkeit der Betriebsregel für die Vorlauftemperatur.

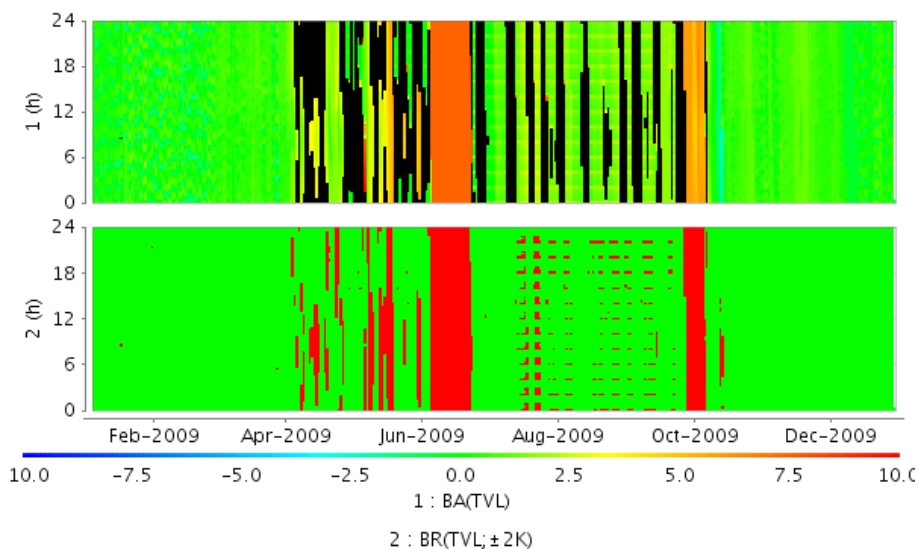


Abbildung 97 oben: Betriebsabweichung (1, Farbskala; schwarz: keine Spezifikation)
unten: Gültigkeit der Betriebsregel (2, grün: TRUE, rot: FALSE)

Da für den betrachteten Zeitraum fast alle Fehler auf qualitätsbedingte Ursachen zurückzuführen sind, würde der Anteil bei vollständig korrektem Betrieb mit ausschließlich systembedingten Fehlern deutlich höher liegen.

Die Auswertung des gesamten Zustandsraums entspricht der Auswertung des jeweils gültigen Betriebszustands.

Auf Basis der gewählten Grenzwerte sind in Abbildung 98 die Werte für die Betriebsgüte für die verschiedenen Zeitspannen für das Jahr 2009 chronologisch und als sortierte Menge von Werten dargestellt.

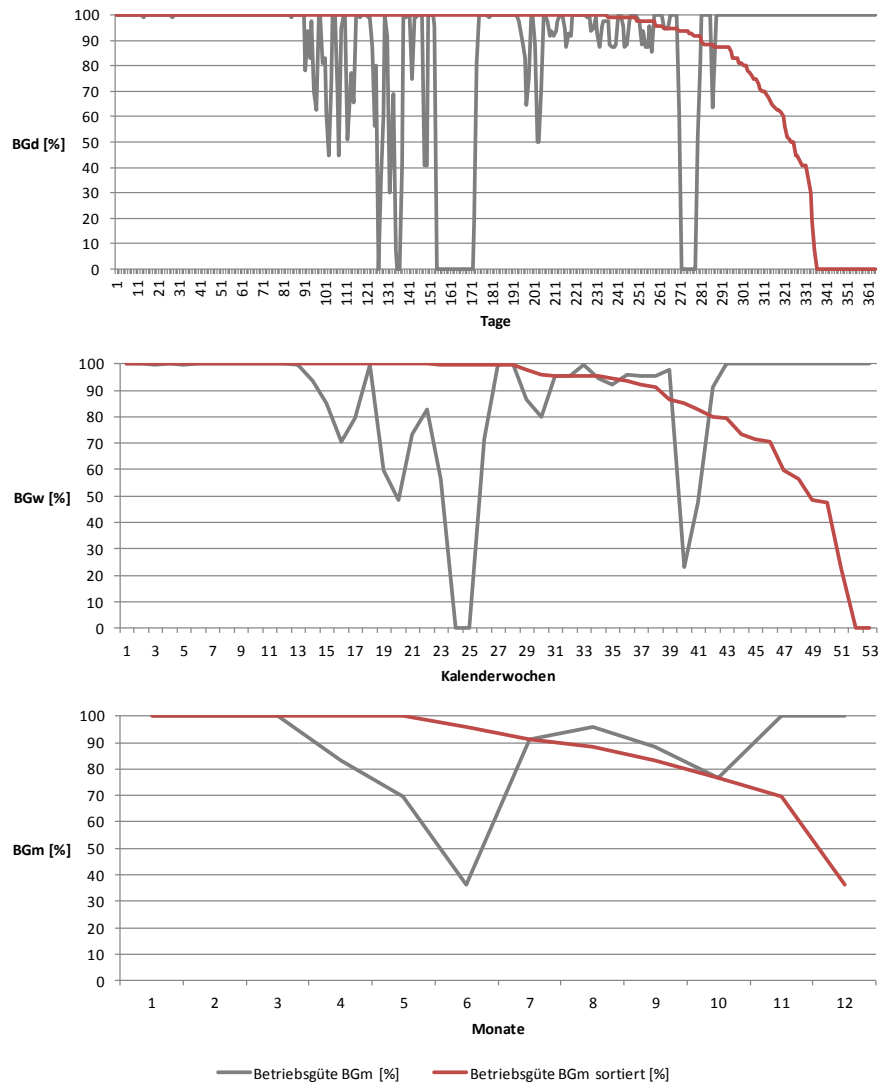


Abbildung 98 Betriebsgüten BG_d , BG_w , BG_m für das Jahr 2009, chronologisch und sortiert

In Tabelle 37 sind ergänzend die Werte für Vierteljahre und das gesamte Jahr 2009 dargestellt.

Tabelle 37 Betriebsgüte für die Vierteljahre und des gesamten Jahr 2009

	Q1	Q2	Q3	Q4	2009
$BG_q; BG_y$	100%	63%	92%	92%	86%

Die Betriebsgüte liegt für das gesamte Jahr bei 86%. Rund 80% der Tageswerte liegen ebenfalls über $BG_d > 80\%$. Insbesondere im Heizbetrieb wird eine hohe Betriebsgüte erreicht. Niedrigere Werte liegen dauerhaft nur in der Zeit vor, in der Daten fehlen bzw. vermutlich ein Eingriff in die

Betriebsführung vorlag. Entsprechend können hier wie schon beim Heizkreis, hohe und für die verschiedenen Zeiträume einheitliche Betriebsgüten als in der Praxis erreichbare Grenzwerte festgelegt werden, siehe Tabelle 38.

Tabelle 38 Grenzwerte für die Betriebsgüte des Zustandsraums

Betriebsgüte für Zeitspannen	Grenzwert
$BG_{day}(\vartheta_{VL}; \pm 2K)$	80%
$BG_{week}(\vartheta T_{VL}; \pm 2K)$	80%
$BG_{month}(\vartheta T_{VL}; \pm 2K)$	80%
$BG_{quarter}(\vartheta T_{VL}; \pm 2K)$	80%
$BG_{year}(\vartheta_{VL}; \pm 2K)$	80%

Wie schon bei der Vorlauftemperatur des Heizkreises, konnte gezeigt werden, dass auch für die Vorlauftemperatur der Betonkernaktivierung mit einem niedrigeren Temperaturniveau und einem deutlich kleineren Regelbereich eine Spezifikation und Überprüfung des Betriebs mit der Aktiven Funktionsbeschreibung erstellt werden kann. Trotz unterschiedlicher Gebäude, Systeme und Systemtemperaturen konnten für die Vorlauftemperatur des Heizkreises und der Betonkernaktivierung die gleichen Grenzwerte für die Betriebsabweichung sinnvoll verwendet und gleichzeitig ähnlich hohe Betriebsgüten nachgewiesen werden. Dies ist ein erster Hinweis darauf, dass eine Standardisierung der verwendeten Grenzwerte auf Basis empirischer Daten möglich ist.

6.3.4 Volumenstrom Betonkernaktivierung

Bei Heiz-/Kühlsystemen mit moderaten Systemtemperaturen kommt den Volumenströmen eine besondere Bedeutung zu, da die Systemtemperaturen nahe an den Temperaturniveaus der Wärmesenke bzw. -quelle liegen und entsprechend hohe Volumenströme erforderlich sind. Werden sie zu niedrig gewählt, steht nicht genug Wärmeleistung zur Verfügung. Überhöhte Volumenströme und Laufzeiten hingegen verursachen durch die größeren Pumpenleistungen einen deutlich höheren Stromverbrauch zu Lasten des Gesamtwirkungsgrades der Anlage. Dementsprechend sind die Volumenströme mit besonderer Sorgfalt zu planen und zu überwachen.

6.3.4.1 Analyse der konventionellen Funktionsbeschreibung

In der vorliegenden konventionellen Funktionsbeschreibung wird keine Angabe zum Volumenstrom in der Betonkernaktivierung gemacht. Da für die Betriebszustände mit Ausnahme der Rücklaufbeimischventile die Positionen aller Stellventile mit Endlagen (AUF/ZU) definiert sind und weitere Regelventile nicht installiert sind, wird von jeweils konstanten Volumenströmen in den Betriebszuständen ausgegangen. Die im Weiteren verwendeten Werte bilden jeweils die Summen der beiden Teilsysteme für den östlichen und den westlichen Neubau des EnergieForums.

6.3.4.2 Spezifikation des Zustandsraums

Es werden die gleichen Betriebszustände wie in Abschnitt 6.3.3 definiert. Aus den Betriebsdaten werden folgende Sollwerte für den Gesamtvolumenstrom in der Betonkernaktivierung abgeleitet:

BZ0/AUS:	$\dot{V}_{BKT} = 0 \text{ m}^3/\text{h}$
BZ1/Heizbetrieb:	$\dot{V}_{BKT} = 24 \text{ m}^3/\text{h}$
BZ2/Kühlbetrieb:	$\dot{V}_{BKT} = 14 \text{ m}^3/\text{h}$

Tabelle 39 fasst die Betriebszustände zusammen.

Tabelle 39 Betriebszustände und Parametrisierung der Eigenschaft in der Aktiven Funktionsbeschreibung

	BZ0 / AUS	BZ1 / Heizen	BZ2 / Kühlbetrieb
Zustandsmerker	!BZ1 && !BZ2	$\vartheta_{\text{amb},24\text{h}} < 14^\circ\text{C}$	$\vartheta_{\text{amb},24\text{h}} > 20^\circ\text{C}$
Volumenstrom BKT [m³/h]	$\dot{V}_{BKT} = 0 \text{ m}^3/\text{h}$	$\dot{V}_{BKT} = 24 \text{ m}^3/\text{h}$	IF ZP THEN $\dot{V}_{BKT} = 14 \text{ m}^3/\text{h}$ ELSE $\dot{V}_{BKT} = 0 \text{ m}^3/\text{h}$

Die Eigenschaft Volumenstrom ist damit in den drei Betriebszuständen mit einer Aktiven Funktionsbeschreibung spezifiziert. Im Gegensatz zur Spezifikation der Vorlauftemperatur wird der Volumenstrom im Kühlbetrieb vollständig vorgegeben: Wenn das Zeitprogramm nicht gültig ist, muss die Umwälzpumpe abgeschaltet sein, so dass kein Volumenstrom vorliegt.

6.3.4.3 Auswertung des Zustandsraums

Für die Auswertung des Zustandsraums werden Datensätze des Jahres 2009 mit jeweils 35.040 Einzelwerten je Datenpunkt verwendet. Abbildung 99 zeigt die Betriebszustände und die Betriebsabweichung für alle drei Betriebszustände für das Jahr 2009, wobei die Werte für die Betriebsabweichung entsprechend der Farbskala dargestellt sind.

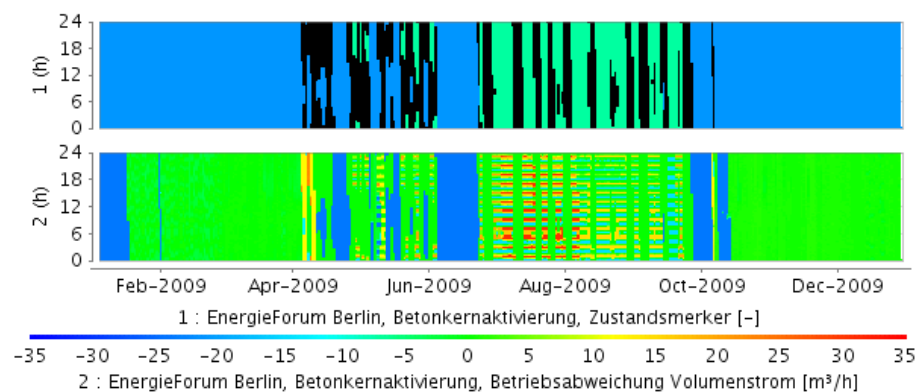


Abbildung 99 oben: Betriebszustände für die Betonkernaktivierung in einem Jahr (schwarz: 0/Aus, blau: 1/Heizen, grün: 2/Kühlbetrieb)
unten: Betriebsabweichung des Volumenstroms, (Farbskala)

Abbildung 100 zeigt die absolute Häufigkeit der einzelnen Werte für die Betriebsabweichung für die Messzeitpunkte im Jahr 2009. Da die Eigenschaft für alle Betriebszustände spezifiziert war, liegen 35.040 Werte für die Betriebsabweichung vor.

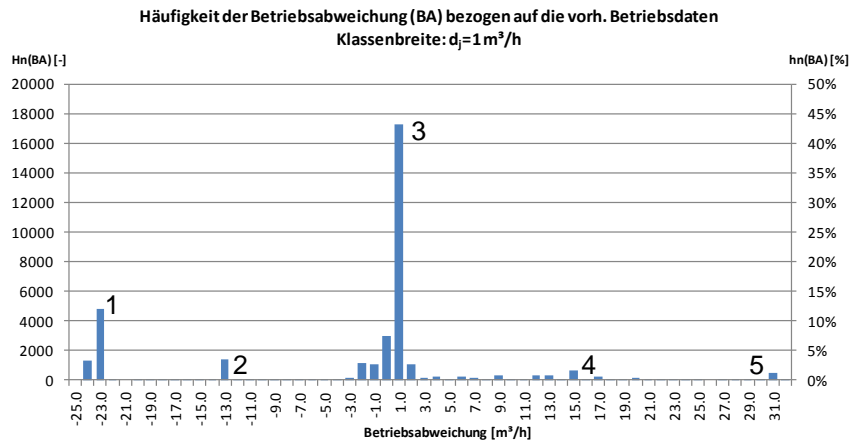


Abbildung 100 Häufigkeit der Betriebsabweichung (BA) bezogen auf die vorhandenen Betriebsdaten in 2009 in den Betriebszuständen Normal- und Absenkbetrieb^{xxxv}

Die Abweichungen werden entsprechend der einzelnen mit Ziffern bezeichneten Bereiche erhöhter Häufigkeit in Bezug auf mögliche Ursachen analysiert, siehe Tabelle 40.

Tabelle 40 Wertebereiche für die Analyse der Betriebsabweichung

1:	$BA_t < -20 \text{ m}^3/\text{h}$
2:	$-20 \text{ m}^3/\text{h} < BA_t < -3 \text{ m}^3/\text{h}$
3:	$-3 \text{ m}^3/\text{h} < BA_t < 3 \text{ m}^3/\text{h}$
4:	$3 \text{ m}^3/\text{h} < BA_t < 20 \text{ m}^3/\text{h}$
5:	$BA_t > 20 \text{ m}^3/\text{h}$

Für die einzelnen Bereiche wird untersucht, zu welchen Betriebszeiten und –zuständen die Betriebsabweichung im betrachteten Jahr in den entsprechenden Wertebereichen lag, um sachlogisch festzustellen, ob die Ursachen als systembedingt oder als qualitätsbedingt entsprechend Abschnitt 5.4 zu bewerten sind.

Bereich 1 ($BA_t < -20 \text{ m}^3/\text{h}$)

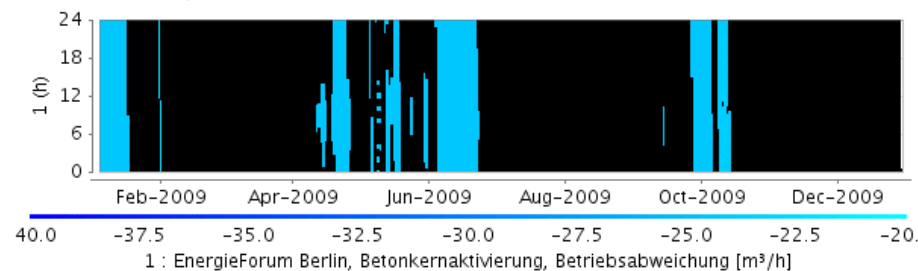


Abbildung 101 Betriebsabweichung $BA_t < -20 \text{ m}^3/\text{h}$

^{xxxv} Für die Darstellung wurden alle vorliegenden Werte verwendet. Zur besseren Lesbarkeit wurden nur die Werte im Bereich -25 bis 31°C dargestellt. Die Klassifizierung erfolgte mit einer Klassenbreite von $d_j = 1,0\text{K}$.

Die Daten für die Betriebsabweichung in diesem Bereich haben alle den Wert $BA_t = -24 \text{ m}^3/\text{h}$. Ursache ist ein fehlender Istwert für den Volumenstrom. Das Fehlen von Betriebsdaten ist ein qualitätsbedingter Fehler.

Bereich 2 ($-20 \text{ m}^3/\text{h} < BA_t < -3 \text{ m}^3/\text{h}$)

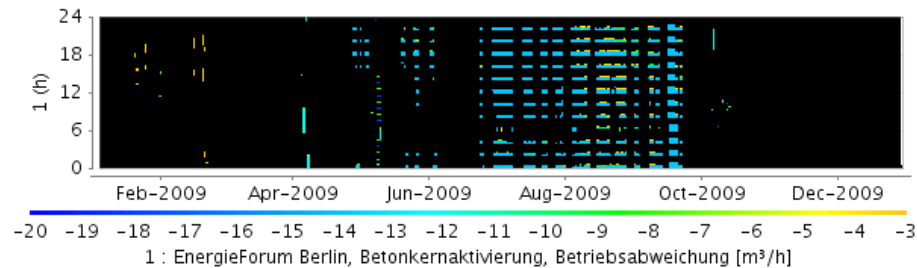


Abbildung 102 Betriebsabweichung $-20 \text{ m}^3/\text{h} < BA_t < -3 \text{ m}^3/\text{h}$

Die Fehler im Bereich 2 treten fast vollständig im Zusammenhang mit dem fehlerhaft spezifizierten Zeitprogramm des Kühlbetriebs auf. Ursache ist, dass die Anlage in Betrieb sein sollte, jedoch abgeschaltet ist, so dass sich eine negative Betriebsabweichung in der Größenordnung des Sollwerts von $BA_t = -14 \text{ m}^3/\text{h}$ ergibt. Der Fehler ist qualitätsbedingt.

Bereich 3 ($-3 \text{ m}^3/\text{h} < BA_t < 3 \text{ m}^3/\text{h}$)

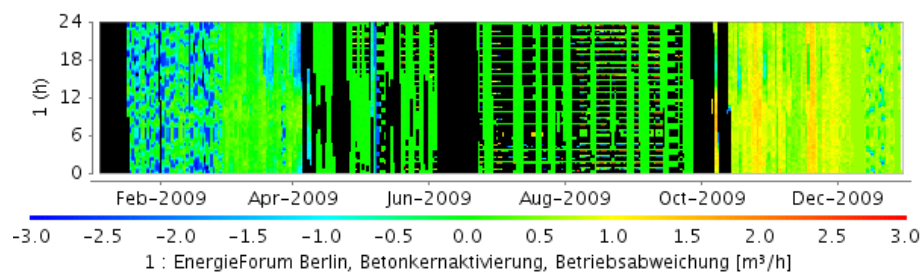


Abbildung 103 Betriebsabweichung $-3 \text{ m}^3/\text{h} < BA_t < 3 \text{ m}^3/\text{h}$

In Bereich 3 entspricht der Istwert mit geringer Abweichung dem Sollwert, so dass diese Fehler, je nach Definition der Grenzwerte, als systembedingte Betriebsabweichungen bewertet werden können.

Bereich 4 ($3 \text{ m}^3/\text{h} < BA_t < 20 \text{ m}^3/\text{h}$)

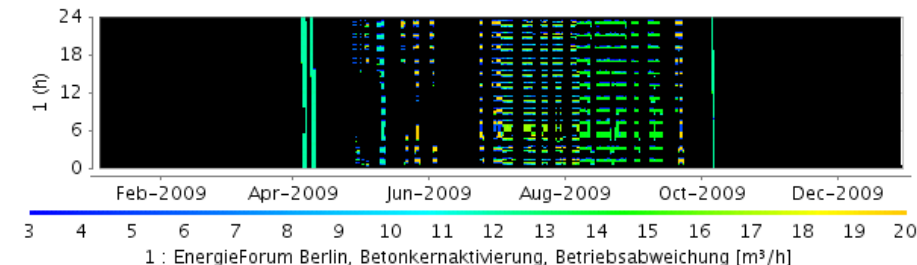


Abbildung 104 Betriebsabweichung $3 \text{ m}^3/\text{h} < BA_t < 20 \text{ m}^3/\text{h}$

Bereich 4 enthält die Daten, die, quasi als Gegenstück zu Bereich 2, gemessen wurden, als die Anlage im Kühlbetrieb lief, das fehlerhaft spezifizierte Zeitprogramm jedoch Betriebszustand 0/AUS forderte. Die Fehler sind ebenfalls qualitätsbedingt.

Bereich 5 ($BA_t > 20\text{m}^3/\text{h}$)

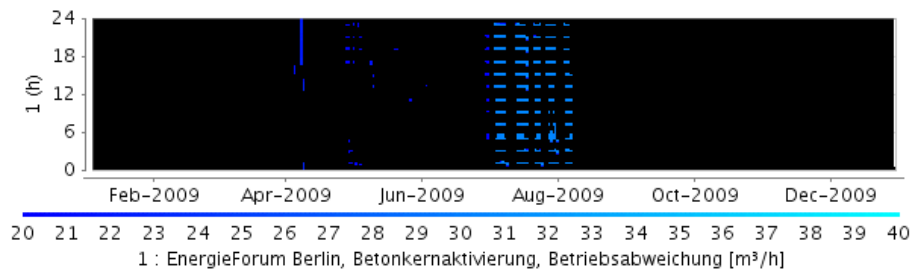


Abbildung 105 Betriebsabweichung $BA_t > 20\text{m}^3/\text{h}$

Ebenfalls in den Kühlbetrieb fallen die Werte im Bereich 5. Hier ist die Anlage wie spezifiziert im Kühlbetrieb. Es wird jedoch ein überhöhter Volumenstrom von ca. $30\text{m}^3/\text{h}$ statt der spezifizierten $14\text{m}^3/\text{h}$ gefahren, so dass eine Betriebsabweichung von ca. $16\text{m}^3/\text{h}$ gemessen wird. Diese Fehler sind ebenfalls qualitätsbedingt.

Tabelle 11 zeigt den Anteil der Werte, die innerhalb verschiedener Grenzwerte der Betriebsabweichung liegen. Da der Volumenstrom für alle Betriebszustände als Eigenschaft definiert ist, ist die Zahl der Messzeitpunkte, an denen die Eigenschaft spezifiziert ist, identisch mit der gesamten Anzahl der Messzeitpunkte.

Tabelle 41 Betriebsdaten innerhalb der Grenzwerte

$BA_{t,lim,top}$	+1 m^3/h	+2 m^3/h	+3 m^3/h
$BA_{t,lim,bottom}$	-1 m^3/h	-2 m^3/h	-3 m^3/h
Anzahl der Messzeitpunkte, für die die Betriebsregel im Betrachtungszeitraum spezifiziert ist	35040	35040	35040
Anzahl der Werte innerhalb der Grenzwerte	20218	22334	23623
Anteil der Werte innerhalb der Grenzwerte bezogen auf die Anzahl der Zeitpunkte im Betrachtungszeitraum, für die die Betriebsregel spezifiziert im Betrachtungszeitraum ist	58%	64%	67%
Anzahl aller Messzeitpunkte im Betrachtungszeitraum	35040	35040	35040
Anzahl der Messzeitpunkte, für die Zustandsraum gültig ist (einschließlich der Zeitpunkte, für die keine Spezifikation vorliegt)	20218	22334	23623
Anteil der Messzeitpunkte, für die die Betriebsregel gültig ist	58%	64%	67%

An den 35040 Messzeitpunkten im Jahr 2009 war der Betrag der Betriebsabweichung an 23623 Zeitpunkten oder 67% der Messzeitpunkte geringer als $3\text{ m}^3/\text{h}$. Aus der Literatur sind dem Autor keine Grenzwerte für die zulässige Abweichung eines Volumenstroms im Betrieb von dem in der Planung spezifizierten Wert bekannt. Es werden deshalb Grenzwerte entsprechend

Gleichung 22 festgelegt.

$$\text{Gleichung 22} \quad BA_{t,lim,top} = 3\text{ m}^3/\text{h} \quad \text{und} \quad BA_{t,lim,bot} = -3\text{ m}^3/\text{h}$$

Von den untersuchten Betriebsdaten für den Volumenstrom für das Jahr 2009 liegen 67% innerhalb dieser Grenzen. Da fast alle Fehler qualitätsbedingt sind, können in der Praxis voraussichtlich deutlich höhere Werte erreicht werden. Abbildung 106 zeigt die Betriebsabweichung und die Gültigkeit der Betriebsregel für die Vorlauftemperatur.

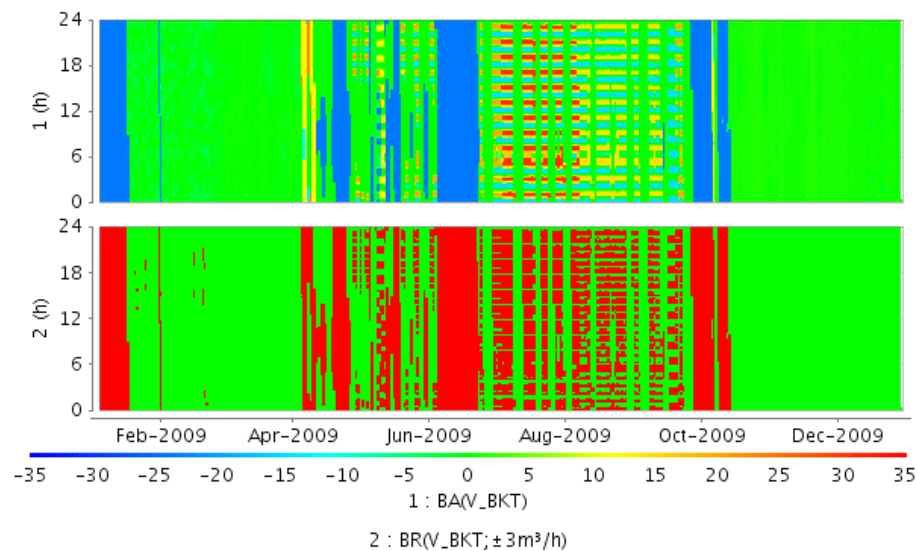


Abbildung 106 oben: Betriebsabweichung
(1, Farbskala)
unten: Gültigkeit der Betriebsregel
(2, grün: TRUE, rot: FALSE)

Die Auswertung des gesamten Zustandsraums entspricht der Auswertung des jeweils gültigen Betriebszustands.

Mit entsprechender Berechnung sind in Abbildung 107 die Werte für die Betriebsgüte für die verschiedenen Zeitspannen für das Jahr 2009 chronologisch und als sortierte Menge von Werten dargestellt.

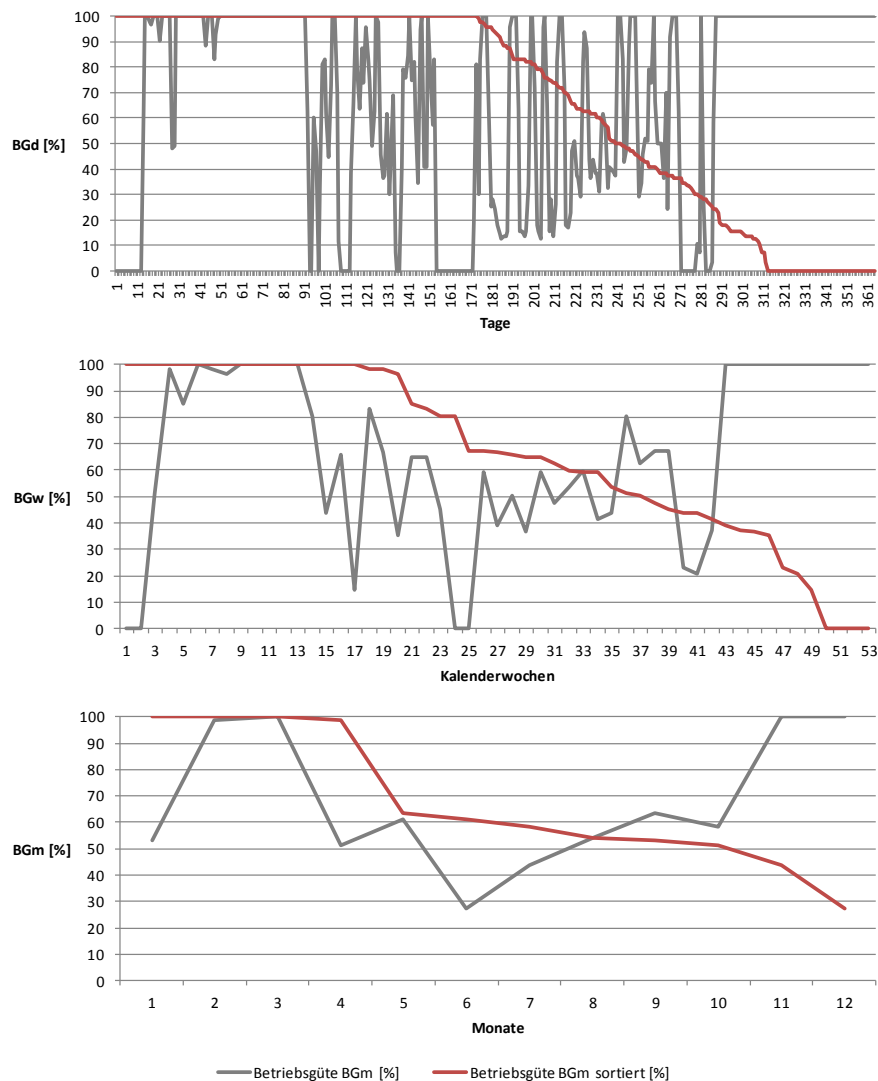


Abbildung 107 Betriebsgüten BG_d , BG_s , BG_m für das Jahr 2009, chronologisch und sortiert

In Tabelle 42 sind ergänzend die Werte für die einzelnen Quartale und das gesamte Jahr 2009 dargestellt.

Tabelle 42 Betriebsgüte für die Vierteljahre und des gesamten Jahr 2009

	Q1	Q2	Q3	Q4	2009
$BG_q; BG_y$	83%	47%	54%	86%	67%

Während des dauerhaften Heizbetriebs liegt die Betriebsabweichung fast immer innerhalb der definierten Grenzwerte, so dass Betriebsgüten von $BG_d=100\%$ erreicht werden. Ausnahmen bilden lediglich die Tage mit fehlenden Betriebsdaten.

Im Kühlbetrieb mit den dargestellten qualitätsbedingten Fehlern liegt die Betriebsgüte in allen zeitlichen Auflösungen – mit Ausnahme des gesamten Jahres – deutlich niedriger, überwiegend zwischen 30 und 70%. Die aufgetretenen Fehler könnten über einen Grenzwert für die Betriebsgüte von 80 bis 90% identifiziert werden.

Entsprechend können für den Volumenstrom hohe und für die verschiedenen Zeiträume einheitliche Betriebsgüten als in der Praxis erreichbare Grenzwerte festgelegt werden, siehe Tabelle 43.

Tabelle 43 Grenzwerte für die Betriebsgüte des Zustandsraums

Betriebsgüte für Zeitspannen	Grenzwert
$BG_q(\dot{V}_{BKT}; \pm 3m^3/h)$	80%
$BG_w(\dot{V}_{BKT}; \pm 3m^3/h)$	80%
$BG_m(\dot{V}_{BKT}; \pm 3m^3/h)$	80%
$BG_q(\dot{V}_{BKT}; \pm 3m^3/h)$	80%
$BG_y(\dot{V}_{BKT}; \pm 3m^3/h)$	80%

Es wurde gezeigt, dass für den Volumenstrom einer Anlage des gezeigten Aufbaus mit der Aktiven Funktionsbeschreibung sowohl die Spezifikation als auch die Überprüfung und Bewertung der Übereinstimmung von Spezifikation und Betrieb möglich ist.

6.3.5 Die Geothermieranlage als komplexer Zustandsraum

Im komplexen Zustandsraum für diese Anlage werden neben den in den vorangegangenen Abschnitten dargestellten Eigenschaften folgende weitere Funktionen definiert.

Betrieb Wärmepumpe: Die Wärmepumpe ist laut Funktionsbeschreibung mit einer eigenen Regelung ausgestattet, die nicht im Detail erläutert wird. Die Wärmepumpe erhält eine Freigabe im Heizbetrieb und ist dann vermutlich in Abhängigkeit von der Speichertemperatur geregelt. Eindeutig vorgegeben ist jedoch, dass die Wärmepumpe im Kühlbetrieb und bei abgeschalteter Energiepfahlanlage abgeschaltet sein soll. Da für die Wärmepumpe keine direkte Betriebsmeldung vorliegt, wird ihre elektrische Leistungsaufnahme als Indikator verwendet.

Speichertemperatur: Aus den Betriebsdaten ist zu erkennen, dass im Heizbetrieb eine Ladehysterese für den Pufferspeicher programmiert ist. Es wird auf Basis dieser Daten davon ausgegangen, dass der (untere) Einschaltgrenzwert für die Wärmepumpe bei 25°C und der (obere) Abschaltgrenzwert bei 32°C liegen. Die Speichertemperatur muss im Heizbetrieb entsprechend zwischen diesen Grenzwerten liegen. Für die anderen Betriebszustände gibt es keine Spezifikation für die Speichertemperatur.

Betrieb Umwälzpumpe Erdreichwärmetauscher: Die Pumpe ist abgeschaltet, wenn die gesamte Anlage abgeschaltet ist (BZ0) und in Betrieb, wenn Kühlbetrieb (BZ2) vorliegt. Im Heizbetrieb (BZ1) läuft die Pumpe genau dann, wenn auch die Wärmepumpe in Betrieb ist. Da für die Pumpe keine Betriebsmeldung vorliegt, wird ihre elektrische Leistungsaufnahme als Indikator verwendet.

Betrieb Umwälzpumpe Betonkernaktivierung: Die Pumpe ist abgeschaltet, wenn die gesamte Anlage abgeschaltet ist (BZ0) und in Betrieb, wenn Heizbetrieb (BZ1) vorliegt. Im Kühlbetrieb (BZ2) läuft die Pumpe nach einem Zeitprogramm. Dies wird aus den Betriebsdaten abgeleitet, da es in der Funktionsbeschreibung nicht spezifiziert ist. Da für die Pumpe keine Betriebsmeldung vorliegt, wird ihre elektrische Leistungsaufnahme als Indikator verwendet.

Mit diesen Eigenschaften wird ein Zustandsraum entsprechend Tabelle 44 spezifiziert.

Tabelle 44 Betriebszustände und Parametrisierung der Eigenschaft in der Aktiven Funktionsbeschreibung

	BZ0 / AUS	BZ1 / Heizen	BZ2 / Freecooling
Zustandsmerker	!1 && !2	$\vartheta_{amb,24h} < 14^{\circ}C$	$\vartheta_{amb,24h} > 20^{\circ}C$
Vorlauftemperatur BKT $\vartheta_{VL} [^{\circ}C]$	Keine Spezifikation	$BA_{TVL,normal,t} >$ $BA_{lim,bot}$ && $BA_{\vartheta VL,normal,t} <$ $BA_{lim,top}$	ZP implies $BA_{\vartheta VL,absenk,t} >$ $BA_{lim,bot}$ && $BA_{\vartheta VL,absenk,t} <$ $BA_{lim,top}$
Volumenstrom BKT $\dot{V}_{BKT} [m^3/h]$	$\dot{V}_{BKT} = 0 m^3/h$	$\dot{V}_{BKT} = 24 m^3/h$	IF ZP THEN $\dot{V}_{BKT} = 14 m^3/h$ ELSE $\dot{V}_{BKT} = 0 m^3/h$
Betrieb Wärmepumpe [-]	AUS	Keine Spezifikation	AUS
Speichertemperatur $\vartheta_{sp} [^{\circ}C]$	Keine Spezifikation	$\vartheta_{sp} > 25^{\circ}C$ && $\vartheta_{sp} < 32^{\circ}C$	Keine Spezifikation
Betrieb Umwälzpumpe EWT [-]	AUS	WP = EIN implies EIN && WP = AUS implies AUS	BKT = EIN implies EIN && BKT = AUS implies AUS

Der Zustandsraum wird für 13.015 bzw. 37 % der insgesamt 35.040 viertelstündlichen Zeitpunkte im Jahr 2009 als gültig ausgewertet, siehe Abbildung 108.

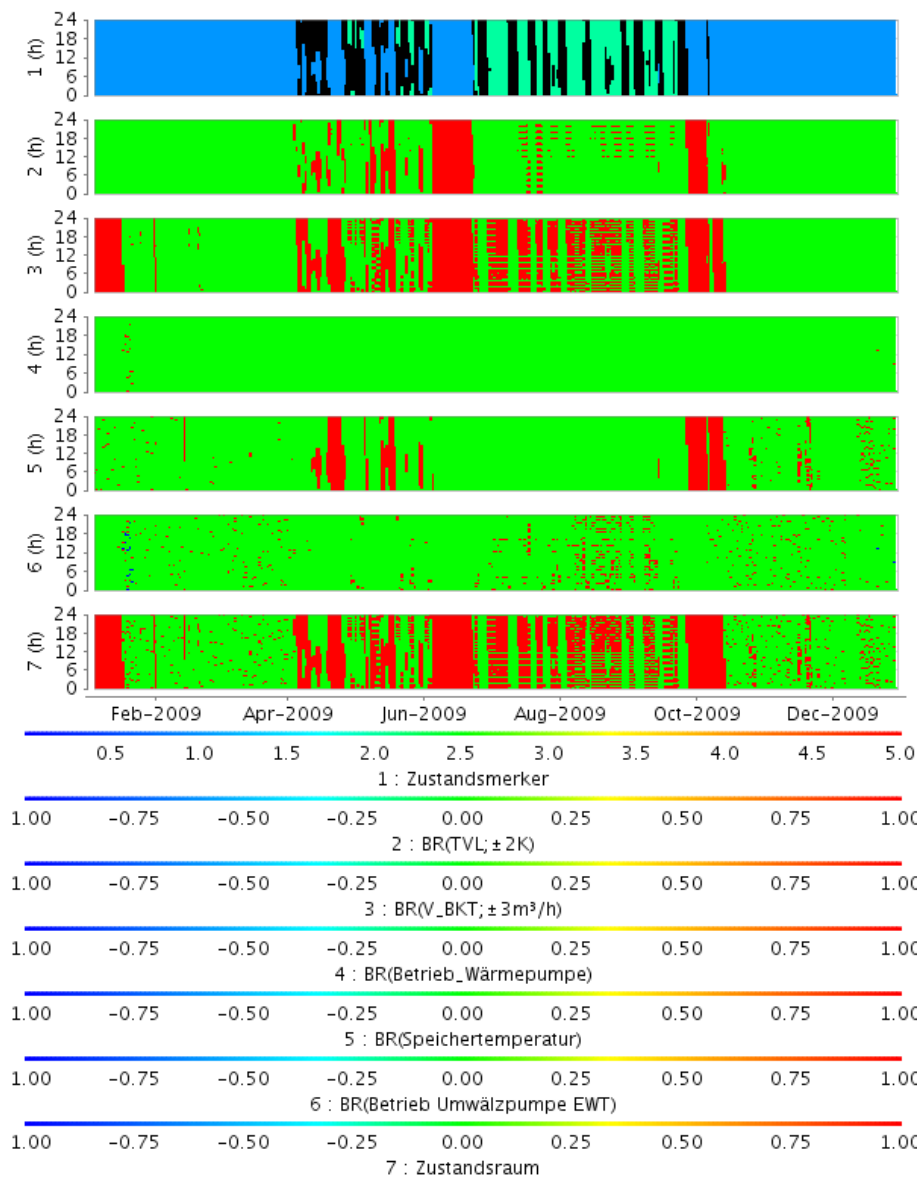


Abbildung 108 Auswertung von Zustandsmerker (1)
 (schwarz: Zustand 0, blau: Zustand 1, grün: Zustand 2)
 Auswertung der Betriebsregeln (2-6) und des Zustandsraum (7)
 grün: gültig, rot: ungültig

Die Auswertung des gesamten Zustandsraums entspricht der Auswertung des jeweils gültigen Betriebszustands.

Mit entsprechender Berechnung sind in Abbildung 109 die Werte für die Betriebsgüte für die verschiedenen Zeitspannen für das Jahr 2009 chronologisch und als sortierte Menge von Werten dargestellt.

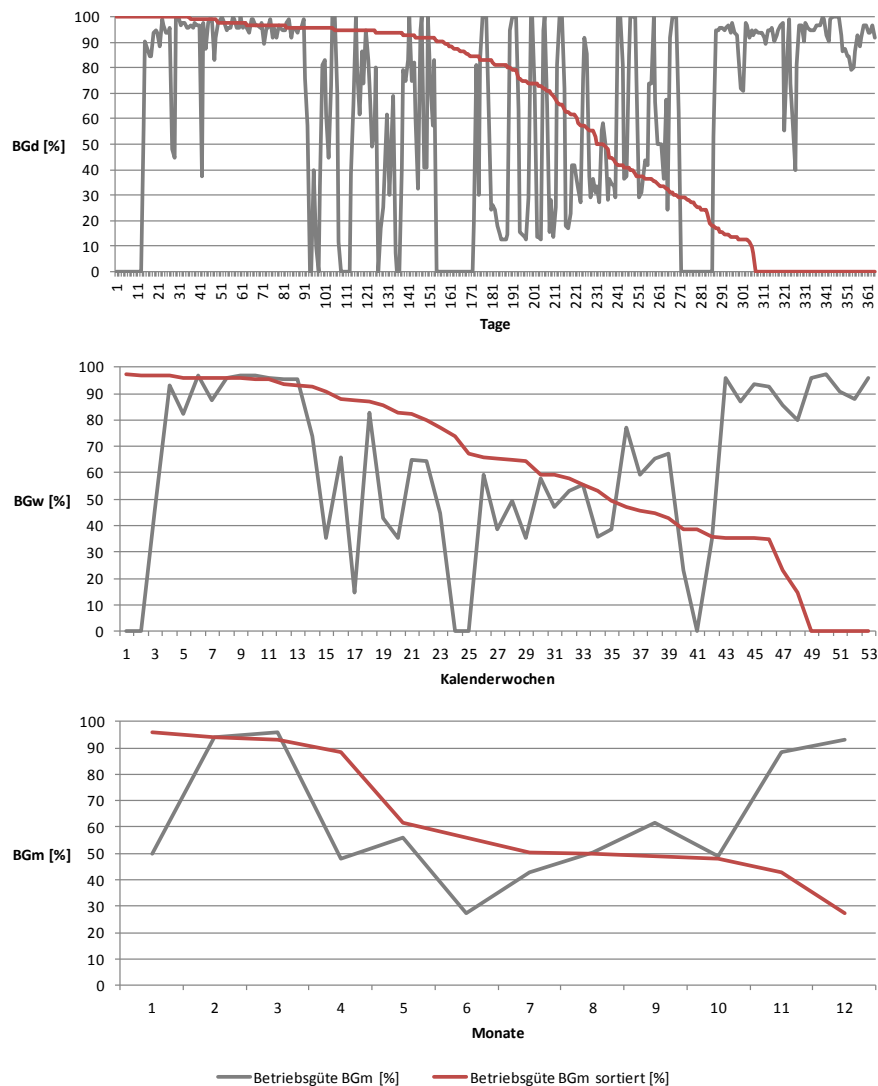


Abbildung 109 Betriebsgüten BG_d , BG_w , BG_m für das Jahr 2009, chronologisch und sortiert

In Tabelle 45 sind ergänzend die Werte für Vierteljahre und das gesamte Jahr 2009 dargestellt.

Tabelle 45 Betriebsgüte für die Vierteljahre und des gesamten Jahr 2009

	Q1	Q2	Q3	Q4	2009
BG_q ; BG_y	80%	44%	51%	77%	63%

Der dargestellte Zustandsraum für die geothermische Anlage ist umfangreicher als die beiden oben bearbeiteten. Die Auswertung zeigt, dass für die beiden detailliert untersuchten Funktionen jeweils eine hohe Betriebsgüte von 80% möglich ist. Auch die anderen, nicht detailliert untersuchten Funktionen zeigen, dass hohe Betriebsgüten möglich sind. Ein Grenzwert von 70% als Mindestanforderung für die Betriebsgüte der gesamten Anlage erscheint unabhängig von der Zeitspanne möglich, siehe Tabelle 46.

Tabelle 46 **Grenzwerte für die Betriebsgüte des Zustandsraums und Anzahl der Zeitspannen im untersuchten Jahr, in dem der Grenzwert eingehalten wurde**

Betriebsgüte für Zeitspannen	Grenzwert	Grenzwert eingehalten an
$BG_{day} (ZR_{BKT}; \pm 2K)$	70%	210 d/a
$BG_{week} (ZR_{BKT}; \pm 2K)$	70%	24 Wochen/a
$BG_{month} (ZR_{BKT}; \pm 2K)$	70%	4 Monate/a
$BG_{quarter} (ZR_{BKT}; \pm 2K)$	70%	2 Vierteljahre/a
$BG_{year} (ZR_{BKT}; \pm 2K)$	70%	nicht eingehalten

Mit der Untersuchung dieser Anlage wurde gezeigt, dass die Spezifikation und Bewertung auch eines komplexeren Zustandsraumes mit der Aktiven Funktionsbeschreibung möglich ist.

6.3.6 Fazit zur oberflächennahen Geothermieanlage

Die Referenzanlage ist zwar ein komplexeres, in der Praxis jedoch in den letzten Jahren bei Nicht-Wohngebäuden zunehmend umgesetztes System. Das oben genannte Forschungsprojekt, aus dem auch die hier verwendeten Betriebsdaten stammen, zeigt gleichzeitig, dass die Systeme in der Praxis die energetischen Zielsetzungen teilweise nicht erreichen und ihr Betrieb von zahlreichen qualitätsbedingten Fehlern gekennzeichnet ist.

Der für die hier analysierte Referenzanlage definierte Zustandsraum bildet wesentliche Vorgaben der konventionellen Funktionsbeschreibung mit Hilfe der Aktiven Funktionsbeschreibung ab. Gleichzeitig konnten die Betriebsdaten für ein Jahr mit der gleichen Beschreibung auf Übereinstimmung mit den Vorgaben überprüft werden. Auch hier deutet sich, wie schon an anderen Stellen an, dass eine Ergänzung von Anlagentypen mit standardisierten Aktiven Funktionsbeschreibungen und Qualitätsstandards, ausgedrückt durch die Betriebsgüte, möglich ist.

7 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Für drei typische Anlagen zur Beheizung, Kühlung und Belüftung von Gebäuden wurde gezeigt, dass es möglich ist, Funktion dieser Anlagen mit der Aktiven Funktionsbeschreibung in der Planung zu spezifizieren und im Betrieb automatisch zu überprüfen. Für diese Anlagen wurden komplexe Zustandsräume spezifiziert, die als standardisierte Modelle in Planung und Betrieb eingesetzt werden können. Mit der Definition der Betriebsgüte wurden messbare Qualitätsziele für die Funktionen entwickelt. Damit ist eine Methode definiert, um in der Bau- und Betriebspraxis ein effektives Qualitätsmanagement für Gebäude und Anlagen durchzuführen.

Die Methodik ermöglicht die Präzisierung der entsprechenden Leistungen in Planung, Errichtung und Betrieb von Gebäuden. Die Einführung in die Baupraxis wird dadurch erleichtert, dass die Erstellung von Funktionsbeschreibungen bereits, wie in Abschnitt 2.2 gezeigt, durch die Vergabe- und Honorarordnungen gefordert wird, auch wenn die Umsetzung in der Praxis bisher wie gezeigt mangelhaft ist. Die Aktive Funktionsbeschreibung bietet nun ein leistungsfähiges Handwerkszeug und kann so als Sonderleistung unmittelbar in die Praxis übernommen werden.

Darüber hinaus eröffnet die Methodik neue Anwendungskonzepte z.B. in den Bereichen Contracting und Public-Private-Partnership, zur internen Qualitätssicherung bei Anbietern von Automationssystemen sowie zur Ergänzung von Zertifizierungssystemen für nachhaltige Gebäude.

Weiterer Forschungsbedarf besteht insbesondere hinsichtlich der experimentellen und empirischen Bestimmung geeigneter Grenzwerte für einzelne Systeme und ihrer funktionale Eigenschaften sowie der technisch-wirtschaftlichen Evaluation der Einführung in die Bau- und Betriebspraxis.

7.1 Einführung in die Baupraxis

Mit der *Aktiven Funktionsbeschreibung* wird für zahlreiche Leistungen des Automationserrichters eine Methodik zur Verfügung gestellt, um Vorgaben der DIN 18386 „VOB Vergabe – und Vertragsordnung für Bauleistungen - Teil C: Allgemeine Technische Vertragsbedingungen für Bauleistungen (ATV) – Gebäudeautomation“²⁵⁸ sowie der DIN 16484-3²⁵⁹ einheitlich, umfassend und präzise zu bearbeiten, siehe Tabelle 47.

Tabelle 47 Aktive Funktionsbeschreibungen in den ATV nach DIN 18386

Phase	Forderung DIN 18386	Anwendung der Aktiven Funktionsbeschreibung
Vor Beginn der Montagearbeiten	Auftraggeber: Funktionsbeschreibungen sowie Angabe von Sollwerten und Betriebszeiten Auftragnehmer: Abstimmung von Automations-schemen mit wesentlichen Funktionen	Darstellung von Zustandsräumen mit Betriebsregeln für die Anlagenfunktionen (im Demonstrator des Energienavigators können die Zustandsräume im Kontext der Anlagenschemen dargestellt werden).
Inbetriebnahme und Einregulierung	„Die Anlagenteile sind so einzustellen, dass die geforderten Funktionen und Leistungen erbracht ... werden. Dazu sind alle physikalischen Ein- und Ausgänge einzeln zu überprüfen, die vorgegebenen Parameter einzustellen und die geforderten Ein- und Ausgabe- sowie Verarbeitungsfunktionen sicherzustellen.“ ²⁶⁰ Dokumentation von Mess- und Einstellwerten. Einweisung des Bedienpersonals.	Unterstützung der Einregulierung durch das automatische Auswerten der Betriebsdaten. Ergänzung und Aktualisierung der Aktiven Funktionsbeschreibung. Einweisung des Betriebspersonals in die Anlagen <u>und</u> die Dokumentation in der Aktiven Funktionsbeschreibung.
Abnahmeprüfung	Prüfung der Automationsfunktionen Dokumentationsunterlagen in „geordneter und aktualisierter Form“ ²⁶¹	Übergabe und Auswertung der Betriebsdaten und Prüfung der Erfüllung der geforderten Betriebsgüte. Übergabe der ergänzten und aktualisierten Aktiven Funktionsbeschreibung.

Für die Anwendung im Bauwesen liegt ein entscheidender Vorteil der *Aktiven Funktionsbeschreibung* in der klaren Abgrenzung des Leistungsbilds des Automationserrichters. Alle Leistungen, insbesondere die in vielen Monitoring-Projekten äußerst zeitaufwändige Identifikation und Dokumentation von Datenpunkten sowie die Datenqualität, sind vollständig Teil der Leistung des Errichters. Diese umfassen:

1. Die korrekte Installation der Sensorik und Aktorik,
2. Die funktionsgerechte Programmierung der Automation,
3. Die vollständige Übergabe der geforderten Betriebsdaten sowie
4. Die korrekte Dokumentation der Funktionen und der Adressierung aller Datenpunkte.

Jedes einzelne Defizit in diesen Bereichen führt zu einer Reduzierung der Betriebsgüte und kann entsprechend im Zuge einer Abnahme nachgefordert werden. Für die Einführung in die Praxis ist diese Verortung der Verantwortung von großer Bedeutung, da diese Leistungen nach VOB – Teil C bereits Aufgabe des Errichters sind und dieser sie auch in seiner jeweiligen Produktumgebung vermutlich am besten erbringen kann. Sind diese Leistungen von anderen, z.B. einem zusätzlichen Monitoring-Berater, zu erbringen, ist der Mehraufwand der Analyse und gar Dokumentation eines fremden Systems sicherlich deutlich höher.

7.2 Neue Anwendungskonzepte

Neben der Anwendung in den Leistungsbildern von Vergabe- und Honorarordnungen bietet die entwickelte Methodik weitere mögliche Anwendungsfelder.

Verschiedene Prozesskonzepte für Bauprojekte versuchen, durch die Neustrukturierung der Projektorganisation eine Optimierung des Produkts „Gebäude“ oder einzelner Teile zu erreichen. Die bereits oben angesprochenen Ansätze des Contracting und des Public-Private-Partnerships erfordern dabei eine klare vertragliche Definition der geschuldeten Leistungen. Diese können mit der Aktiven Funktionsbeschreibung präzise gefasst und über die teilweise langen Vertragslaufzeiten kontinuierlich und mit geringem Aufwand überprüft werden.

Für die Gebäudeautomationsbranche bietet die Methodik die Möglichkeit, funktionale Qualität nicht nur als theoretische Lösung sondern als praktisch umgesetzten und nachgewiesenen Service anzubieten. Innovative Errichter können dabei die Aktive Funktionsbeschreibung auch für eine einheitliche und konsistente Prüfung und Evaluation der eigenen Leistungen im Feld nutzen. Das Produkt kann so verbessert und entsprechende Qualitätsvorteile am Markt angeboten werden.

Für die in den letzten Jahren boomenden Zertifizierungssysteme für nachhaltige Gebäude bietet sich die Möglichkeit, die Zertifizierung mit einfachen und kostengünstigen Leistungen in den Betrieb fortzuschreiben. Statt wie z.B. aktuell in LEED gefordert, eine Gebäudesimulation mit jährlichen Verbrauchswerten gegenüberzustellen, was insbesondere bei hocheffizienten Gebäuden wenig aussagekräftig ist, können die geplanten Funktionalitäten kontinuierlich und präzise überwacht werden.

7.3 Weiterer Forschungsbedarf

Durch die Methodik der Aktiven Funktionsbeschreibung eröffnet sich ein umfangreiches Feld neuer Forschungsaktivitäten. Dies betrifft zum einen die umfangreiche Anwendung und Detaillierung der Methodik in den vielen gebäudetechnischen Anlagentypen, die Entwicklung von standardisierten Grenzwerten sowie die Evaluation der Anwendung Aktiver Funktionsbeschreibungen sowie der Auswirkung auf die Wirtschaftlichkeit von Gebäuden und Anlagen insbesondere mit einem hohen Automationsgrad.

7.3.1 Betriebszustände und Transitionen

Gebäudetechnische Systeme befinden sich nicht zu jedem Zeitpunkt in Betriebszuständen, deren Eigenschaften präzise beschrieben werden können. Beispiel ist wie oben genannt die Vorlauftemperatur in einem Heizkreis beim Umschalten von Normal- in Absenkbetrieb. Diese systembedingten Fehler sind nicht vermeidbar und bestimmen so die maximalen Anforderungen an die Betriebsgüte. Ihr Einfluss nimmt mit der Anzahl der entsprechenden Transitionen zu.

Dies ist ein kritischer Punkt, der bei der Entwicklung von Grenzwerten beachtet werden muss. Allerdings kann unterstellt werden, dass die Dauer unbestimmter Betriebszustände in Folge von Transitionen nicht übermäßig groß wird, da dies bedeuten würde, dass sich das entsprechende System längere Zeit in einem unbestimmten funktionalen Zustand befände, was in der Regel nicht Ziel einer Planung sein dürfte.

Für den Fall, dass weitere Anwendungsfälle entsprechende Charakteristiken aufzeigen, bietet die Aktive Funktionsbeschreibung ein hohes Maß an Flexibilität. Zum einen kann der hier verwendete Zeitschritt für die Be-

triebsdaten von 15 Minuten verkleinert werden, um ein detaillierteres Modell der Funktionen erzeugen zu können. Zum anderen können komplexe Zustandsräume in Teilräume zerlegt werden, um einzelne Eigenschaften separat betrachten zu können. Damit bestehen zwei konkrete Optionen innerhalb der Methodik, um auf zusätzliche Anforderungen zu reagieren.

7.3.2 Standardisierte Grenzwerte

Als nächste Schritte werden die umfassende Standardisierung von Anlagen, Funktionen und entsprechenden Qualitätsstandards, die Anwendung der Methodik in der Praxis sowie die Prüfung der Auswirkungen der Qualitätssicherung auf die Wirtschaftlichkeit der Anlagen gesehen.

Für die Standardisierung ist es naheliegend, einen Katalog typischer gebäudetechnischer Anlagen zu entwickeln. Aufbau und Funktionen sind für zahlreiche Anlagen in standardisierter Form vorhanden, auch wenn sie in der Automation herstellerabhängig umgesetzt werden. Durch die ergebnisorientierte Spezifikation der Aktiven Funktionsbeschreibung mit wenigen Betriebszuständen und Funktionen kann die Standardisierung voraussichtlich weitgehend unabhängig von einzelnen Produkten erfolgen. Für einzelne Anlagenparameter wie Systemtemperaturen und Volumenströme von wasser- und luftführenden Systemen, für Sequenzen und für Betriebszeiten können präzise zulässige Betriebsabweichungen und entsprechende Betriebsregeln definiert werden. Auch Kennwerte für die Betriebsgüte müssen umfangreich ermittelt werden.

Methodisch kann dies sowohl, wie in dieser Arbeit, durch empirische Untersuchungen erfolgen. Diese können auch sicherstellen, dass die Methodik tatsächlich praxistauglich ist. Darüber hinaus ist eine Erprobung auf Testständen sinnvoll, um Best Practice Standards gerade ohne den Einfluss der praktischen Anwendung zu bestimmen. In ähnlicher Weise wäre es auch sinnvoll, Schnittstellen zur Gebäudesimulation zu entwickeln, um Aktive Funktionsbeschreibungen bereits in der Planung prüfen zu können.

7.3.3 Technisch-wirtschaftliche Evaluation

Durch die Anwendung der Aktiven Funktionsbeschreibung in der Praxis kann die Wirtschaftlichkeit von Anlagen präziser ermittelt werden. Im Zuge der Anwendung werden die Qualität der Funktion und die Schaffung aller notwendigen Voraussetzungen für die Erreichung dieser Qualität voraussichtlich zu einer verbesserten Anlagenperformance, aber ggf. auch zu einem Mehraufwand des Errichters der Anlage bzw. der Automation führen. Das notwendige Qualitätsmanagement wird damit Teil der geschuldeten Leistung und seine Kosten Teil der Wirtschaftlichkeitsberechnung für diese Anlagen. Erst dann ist eine realistische Bewertung der Wirtschaftlichkeit der Anlagen unter Einbeziehung risikobehafteter Automationsstrategien möglich.

7.4 Ausblick

Die energiepolitischen Ziele der Bundesrepublik Deutschland sind sehr ambitioniert. Gebäude werden bei ihrer Erreichung eine zentrale Rolle einnehmen müssen. Um die gesetzten Ziele zu erreichen und dabei die besten Lösungen einzusetzen, ist – angesichts der aktuellen Defizite – eine Verbesserung des Qualitätsmanagements im Gebäudebereich dringend erforderlich. *Aktive Funktionsbeschreibungen* bieten hierzu eine effektive, praxistaugliche und kostengünstige Möglichkeit. Diese Arbeit soll der Startschuss für ihre Einführung in die Praxis sein.

8 ANHANG

Die Dissertation ist im Kontext des Forschungsprojekts Energie-Navigator (FKZ: 0327444A) des IGS – Institut für Gebäude- und Solartechnik der TU Braunschweig in Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl Software-Engineering der RWTH Aachen entstanden. Im Folgenden werden neben den Literaturangaben Veröffentlichungen gelistet, die im Verlauf des Projekts publiziert wurden.

8.1 Veröffentlichungen und Vorträge zu Aktiven Funktionsbeschreibungen und zum Energie-Navigator

Herborn, Franziska; Uwe Friedrich; FIZ Karlsruhe (Hrsg.): „Software für die energieoptimierte Betriebsführung von Gebäuden“, projektinfo 14/10, ISSN 0937-8367, bine Informationsdienst, Bonn, 2010

Plesser, Stefan; Claas Pinkernell, Achim Lindt: „Betrieben, wie gebaut, wie geplant – Planungswerkzeug schließt Schnittstelle zwischen Planung, Errichtung und Betrieb“, cci Zeitung 14/2011, Karlsruhe, 2011

Plesser, Stefan; M. Norbert Fisch; Claas Pinkernell; Bernhard Rumpe: „Der Energie-Navigator – die Arbeitsplattform zur Funktionalen Qualitätssicherung bei Gebäuden“, Vortrag auf der Bauhaus Solar, Erfurt, 10./11. November 2010

Plesser, Stefan; M. Norbert Fisch; Claas Pinkernell; Thomas Kurpick; Bernhard Rumpe: „The Energy Navigator – A web based Platform for the Functional quality Management in Buildings“, Conference Proceedings, ICEBO - International Conference on Building Performance; Kuwait, 2010

Plesser, Stefan; Claas Pinkernell; Markus Look; M. Norbert Fisch; Bernhard Rumpe: „Der Energie-Navigator: Performance- Controlling für Gebäude und Anlagen: Eine Internet-Plattform zur Planung, Überwachung und Dokumentation von Gebäude- und Anlagenfunktionen“, TAB – Technik am Bau, 4/2011, Seiten 36 - 41

Plesser, Stefan; Claas Pinkernell; M. Norbert Fisch; Bernhard Rumpe: „The Energy Navigator – A Web-Platform for Performance Design and Management“, Conference Proceedings, IEECB, Frankfurt, 2012

M. Norbert Fisch; Markus Look; Claas Pinkernell; Plesser, Stefan; Bernhard Rumpe: „State-Based Modeling of Buildings and Facilities“, Conference Proceedings, ICEBO - International Conference on Building Performance, New York, 2011

8.2 Literatur

-
- ¹ Katipamula, Srinivas; Michael R. Brambley: "Methods for Fault Detection, Diagnostics, and Prognostics for Building Systems-A Review, Part II", HVAC&R RESEARCH, Volume 11/1, 2005
 - ² Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung – EnEV), Bundesgesetzblatt Jahrgang 2007 Teil I Nr. 34, ausgegeben zu Bonn am 26. Juli 2007
 - ³ Katipamula, Srinivas; Michael R. Brambley: "Methods for Fault Detection, Diagnostics, and Prognostics for Building Systems-A Review, Part I", HVAC&R RESEARCH, Volume 11/1, 2005, Seite 181
 - ⁴ WSchVo 77/82: „Verordnung über einen energiesparenden Wärmeschutz bei Gebäuden (Wärmeschutzverordnung – WärmeschutzV)“, Bonn 1977/ 1982 und DIN 4108: „Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden“, Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag, Berlin 2003
 - ⁵ WSchVo 95: „Verordnung über einen energiesparenden Wärmeschutz bei Gebäuden (Wärmeschutzverordnung – WärmeschutzV)“, Bonn, 1993
 - ⁶ Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010
 - ⁷ Energieeinsparverordnung (EnEV) 2007, in der Fassung der Bekanntmachung vom 24. Juli 2007 (BGBl. I S. 1519)
 - ⁸ DIN V 18599: „Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung“, Beuth-Verlag, Berlin, 2011-12
 - ⁹ Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010, Absatz (3)
 - ¹⁰ Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010, Absatz (5)
 - ¹¹ Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010, Absatz (18)
 - ¹² Redlich, C.A. et al.: „Sick-building syndrome“, The Lancet 05.04.1997, Vol. 349, S. 1013-1016
 - ¹³ Fanger, P.O.: „Introduction of the olf and the decipol units to quantify air pollution perceived by humans indoors and outdoors“, Energy and Buildings, Volume 12, Issue 1, 24 April 1988, Pages 1-6
 - ¹⁴ DIN EN ISO 7730: „Ergonomie der thermischen Umgebung - Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und des PPD-Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit“, Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag, Berlin 2006
 - ¹⁵ Voss, K.; Löhnert, G.; Herkel, S.; Wagner, A.; Wambsganß, M.: „Bürogebäude mit Zukunft“, Solarpraxis Verlag, Berlin 2007
 - ¹⁶ Fisch, M. Norbert; Plesser, Stefan: „Energiedesign der Zukunft. Visionen der Gebäudetechnik“, DBZ Deutsche Bauzeitschrift Ausgabe 03 / 2005, Bauverlag BV GmbH, Gütersloh 2005, S. 55-59
 - ¹⁷ Hausladen, G. et al.: „ClimaDesign: Lösungen für Gebäude, die mit weniger Technik mehr können“, Callwey 2005

-
- ¹⁸ Voss, K.; Löhnert, G.; Herkel, S.; Wagner, A.; Wambsganß, M.: „Bürogebäude mit Zukunft“, Solarpraxis Verlag, Berlin 2007, S. 38
- ¹⁹ Richtlinie 2002/91/EG des europäischen Parlaments und des Rates RATES vom 16. Dezember 2002 über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden
- ²⁰ DIN V 18599: „Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung“, Beuth-Verlag, Berlin, 12-2011
- ²¹ DIN EN ISO 16484: „Systeme der Gebäudeautomation“, Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag, Berlin 2004
- ²² DIN 19226: „Leittechnik – Regelungs- und Steuerungstechnik“, Allgemeine Grundbegriffe, Beuth Verlag, Berlin 1995
- ²³ DIN 19227: „Leittechnik – Grafisch Symbole und Kennbuchstaben für die Prozess-technik“, Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag, Berlin 1991
- ²⁴ DIN EN ISO 16484 Teil 1-6: „Systeme der Gebäudeautomation (GA)“, Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag, Berlin 2004-2011
- ²⁵ VDI 3814: „Gebäudeautomation (GA)“, Verband Deutscher Ingenieure, Düsseldorf, 2005
- ²⁶ DIN V 32734:1992: „Digitale Automation für die Technische Gebäudeausrüstung“, Beuth Verlag, Deutsches Institut für Normung, Berlin 1992
- ²⁷ DIN EN ISO 16484 Teil 1: „Systeme der Gebäudeautomation (GA) - Teil 1: Projektplanung und –ausführung“ Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag, Berlin 2010, S. 13
- ²⁸ DIN 19226: „Leittechnik – Regelungs- und Steuerungstechnik“, Allgemeine Grundbegriffe, Beuth Verlag, Berlin 1995
- ²⁹ Arbeitskreis der Professoren in der Regelungstechnik in der Versorgungstechnik: „Regelungs- und Steuerungstechnik in der Versorgungstechnik“, C. F. Müller Verlag, 5. Auflage, Heidelberg 2002, S. 8
- ³⁰ DIN 19226: „Leittechnik – Regelungs- und Steuerungstechnik“, Allgemeine Grundbegriffe, Beuth Verlag, Berlin 1995
- ³¹ Arbeitskreis der Professoren in der Regelungstechnik in der Versorgungstechnik: „Regelungs- und Steuerungstechnik in der Versorgungstechnik“, C. F. Müller Verlag, 5. Auflage, Heidelberg 2002, S. 6
- ³² Bildschirmdarstellung der Automationsanlage Siemens Desigo des Informatikzentrums der Technischen Universität Braunschweig, Braunschweig, 2012
- ³³ DIN EN 149081 Teil 1-6: „Firmenneutrale Datenkommunikation für die Gebäudeautomation und Gebäudemanagement - Gebäudedaten-netzprotokoll Beuth, Berlin 2006/2007
- ³⁴ DIN EN 50090: „Elektrische Systemtechnik für Heim und Gebäude (ESHG)“, Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag, Berlin 2010
- ³⁵ DIN EN ISO 16484-5: „Systeme der Gebäudeautomation – Teil 5: Datenkommunikationsprotokoll“, Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag, Berlin 2011
- ³⁶ DIN EN 13321-2: „Offene Datenkommunikation für die Gebäudeautomation und Gebäudemanagement - Elektrische Systemtechnik für Heim und Gebäude - Teil 2: KNXnet/IP Kommunikation; Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag, Berlin 2006/2007

-
- ³⁷ VDI 3814: „Gebäudeautomation (GA)“, Verband Deutscher Ingenieure, Düsseldorf, 2005
- ³⁸ DIN EN ISO 16484 Teil 1: „Systeme der Gebäudeautomation (GA) - Teil 1: Projektplanung und –ausführung“ Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag, Berlin 2010
- ³⁹ VDI 3814: „Gebäudeautomation (GA), Teil 1, Systemgrundlagen“, Verband Deutscher Ingenieure, Düsseldorf, 2005, S.52
- ⁴⁰ DIN EN ISO 16484-3: „Systeme der Gebäudeautomation – Teil 3: Funktionen“, Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag, Berlin 2005, Seite 21
- ⁴¹ DIN EN 15232: „Energieeffizienz von Gebäuden – Einfluss von Gebäudeautomation und Gebäudemanagement“, Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag, Berlin 2007
- ⁴² Voss, K.; Löhnert, G.; Herkel, S.; Wagner, A.; Wambsganß, M.: „Bürogebäude mit Zukunft“, Solarpraxis Verlag, Berlin 2007
- ⁴³ Mansson, Lars-Göran et al.: IEA Annex 17: “Building Energy Management Systems – Evaluation and Emulation Techniques”
- ⁴⁴ Fisch, M. N.; Plesser, S., et al.: „EVA - Evaluierung von Energiekonzepten für Bürogebäude“: (Gesamt-) Abschlussbericht. Braunschweig / Hannover, Technische Informationsbibliothek u. Universitätsbibliothek, 2007
- ⁴⁵ ModBen – Endbericht: „Modellbasierte Methoden für die Fehlererkennung und Optimierung im Gebäudebetrieb“, Fraunhofer ISE, Freiburg Juli 2011
- ⁴⁶ Baumann, Oliver: “OASE - Optimierung der Automationsfunktionen betriebstechnischer Anlagen mit Hilfe der dynamischen Simulation als Energie-Management-System“, Abschlussbericht zum Vorhaben OASE, Förderkennzeichen 0327246D, München 2005
- ⁴⁷ Plesser, Stefan, Susann Gräff, Matthias Rozynski, M. Norbert Fisch: „www.EnBop.info - Netzwerk für Betriebsoptimierung“, Intelligente Architektur XIA 04-06 2012, Seite 066-071, Leinfelden-Echterdingen, 2012
- ⁴⁸ Franzke, Uwe, Heiko Schiller: „Untersuchungen zum energieeinsparpotenzial der Raumluftechnik in Deutschland“, ILK Dresden, Fachbericht ILK-B-31-11-3667, Dresden, 2011
- ⁴⁹ Energieeinsparverordnung (EnEV) 2007, in der Fassung der Bekanntmachung vom 24. Juli 2007 (BGBl. I S. 1519)
- ⁵⁰ DIN EN 15232: „Energieeffizienz von Gebäuden – Einfluss von Gebäudeautomation und Gebäudemanagement“, Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag, Berlin 2007
- ⁵¹ Arbeitskreis der Dozenten der Regelungstechnik, „Regelungs- und Steuerungstechnik in der Versorgungstechnik“, C. F. Müller Verlag, 5. Auflage, Heidelberg 1988, S. 353
- ⁵¹ DIN 19226: „Leittechnik – Regelungs- und Steuerungstechnik“, Allgemeine Grundbegriffe, Beuth Verlag, Berlin 1995
- ⁵² Verordnung über die Honorare für Leistungen der Architekten und der Ingenieure (Honorarordnung für Architekten und Ingenieure - HOAI), Vom 17. September 1976 in der Fassung der Fünften Verordnung zur Änderung der Honorarordnung für Architekten und Ingenieure vom 21. September 1995
- ⁵³ Verordnung über die Honorare für Leistungen der Architekten und der Ingenieure (Honorarordnung für Architekten und Ingenieure - HOAI): Siehe ⁵², §2, S. 3

-
- ⁵⁴ Verordnung über die Honorare für Leistungen der Architekten und der Ingenieure (Honorarordnung für Architekten und Ingenieure - HO-Al): Siehe ⁵², §2, S. 3
- ⁵⁵ Verordnung über die Honorare für Leistungen der Architekten und der Ingenieure (Honorarordnung für Architekten und Ingenieure - HO-Al): Siehe ⁵², § 73, S. 68
- ⁵⁶ Verordnung über die Honorare für Leistungen der Architekten und der Ingenieure (Honorarordnung für Architekten und Ingenieure - HO-Al): Siehe ⁵², § 73, S. 68
- ⁵⁷ Verordnung über die Honorare für Leistungen der Architekten und der Ingenieure (Honorarordnung für Architekten und Ingenieure - HO-Al): Siehe ⁵², § 73, S. 69
- ⁵⁸ Verordnung über die Honorare für Leistungen der Architekten und der Ingenieure (Honorarordnung für Architekten und Ingenieure - HO-Al): Siehe ⁵², § 73, S. 69
- ⁵⁹ DIN 18386: „VOB Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen - Teil C: Allgemeine Technische Vertragsbedingungen für Bauleistungen (ATV) – Gebäudeautomation“, Deutsche Norm, Ausgabe: 2010-04
- ⁶⁰ Baumann, Herbert: „Gebäudeautomation, Kommentar zur VOB Teil C“, Deutsches Institut für Normung, Beuth-Verlag, Berlin 2001, S. 78
- ⁶¹ DIN 18379: „VOB Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen - Teil C: Allgemeine Technische Vertragsbedingungen für Bauleistungen (ATV) - Raumluftechnische Anlagen“, Deutsches Institut für Normung, Beuth-Verlag, Berlin 2010; Abschnitt 3.2.8
- ⁶² „Verordnung zur Änderung der Energieeinsparverordnung“ (EnEV 2009), in der Fassung der Bekanntmachung vom 30. April 2009 (BGBl. I S. 954)
- ⁶³ DIN EN 15232: „Energieeffizienz von Gebäuden – Einfluss von Gebäudeautomation und Gebäudemanagement“, Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag, Berlin 2007
- ⁶⁴ DIN 18299: VOB Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen - Teil C: Allgemeine Technische Vertragsbedingungen für Bauleistungen (ATV) - Allgemeine Regelungen für Bauarbeiten jeder Art, Beuth Verlag, Berlin 2010-04
- ⁶⁵ DIN 18386: „VOB Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen - Teil C: Allgemeine Technische Vertragsbedingungen für Bauleistungen (ATV) – Gebäudeautomation“, Deutsche Norm, Ausgabe: 2010-04
- ⁶⁶ DIN V 18599: Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung, Beuth Verlag, Berlin 2011-12
- ⁶⁷ DIN EN 15232:2007-11 „Energieeffizienz von Gebäuden – Einfluss der Gebäudeautomation und Gebäudemanagement“, Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag, Berlin 2007
- ⁶⁸ DIN EN 15232:2007-11 „Energieeffizienz von Gebäuden – Einfluss der Gebäudeautomation und Gebäudemanagement“, Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag, Berlin 2007, Seite 4
- ⁶⁹ DIN 18386: „VOB Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen - Teil C: Allgemeine Technische Vertragsbedingungen für Bauleistungen (ATV) – Gebäudeautomation“, Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag, Berlin 2010

-
- ⁷⁰ DIN 18299: „Allgemeine Regeln für Bauarbeiten jeder Art“, VOB Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen - Teil C: „Allgemeine Technische Vertragsbedingungen für Bauleistungen (ATV) - Allgemeine Regelungen für Bauarbeiten jeder Art“, Deutsches Institut für Normung, Beuth-Verlag, Berlin 2010
- ⁷¹ VDI 3814: „Gebäudeautomation (GA)“, Verband Deutscher Ingenieure, Düsseldorf, 2005
- ⁷² DIN 18386: „VOB Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen - Teil C: Allgemeine Technische Vertragsbedingungen für Bauleistungen (ATV) – Gebäudeautomation“, Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag, Berlin 2010, Abschnitt 3.1.1
- ⁷³ Baumann, Herbert: „Gebäudeautomation, Kommentar zur VOB Teil C“, Deutsches Institut für Normung, Beuth-Verlag, Berlin 2001, S. 64
- ⁷⁴ Baumann, Herbert: „Gebäudeautomation, Kommentar zur VOB Teil C“, Deutsches Institut für Normung, Beuth-Verlag, Berlin 2001
- ⁷⁵ Baumann, Herbert: „Gebäudeautomation, Kommentar zur VOB Teil C“, Deutsches Institut für Normung, Beuth-Verlag, Berlin 2001, S. 77
- ⁷⁶ DIN EN ISO 16484-1: „Systeme der Gebäudeautomation – Teil 1: Projektplanung und -ausführung“, Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag, Berlin 2004, Seite 12
- ⁷⁷ DIN EN ISO 16484-1: „Systeme der Gebäudeautomation – Teil 1: Projektplanung- und -ausführung“, Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag, Berlin 2004, Seite 14
- ⁷⁸ DIN EN ISO 16484-1: „Systeme der Gebäudeautomation – Teil 1: Projektplanung und -ausführung“, Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag, Berlin 2004, Seite 15
- ⁷⁹ DIN EN 13829: „Bestimmung der Luftdurchlässigkeit von Gebäuden“, Deutsches Institut für Normung, Februar 2001
- ⁸⁰ DIN EN 13779: „Lüftung von Nichtwohngebäuden - Allgemeine Grundlagen und Anforderungen für Lüftungs- und Klimaanlageanlagen und Raumkühlsysteme“, Beuth Verlag, Berlin 2007
- ⁸¹ DIN EN ISO 16484-1: „Systeme der Gebäudeautomation – Teil 1: Projektplanung und -ausführung“, Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag, Berlin 2004, Seite 30
- ⁸² DIN EN ISO 16484-1: „Systeme der Gebäudeautomation – Teil 1: Projektplanung und -ausführung“, Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag, Berlin 2004, Seite 31
- ⁸³ DIN EN 12599: „Lüftung von Gebäuden – Prüf- und Messverfahren für die Übergabe eingebauter raumluftechnischer Anlagen“, Deutsches Institut für Normung, August 2000
- ⁸⁴ DIN EN 12599: „Lüftung von Gebäuden – Prüf- und Messverfahren für die Übergabe eingebauter raumluftechnischer Anlagen“, Deutsches Institut für Normung, August 2000
- ⁸⁵ DIN EN ISO 7730: „Ergonomie der thermischen Umgebung - Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und des PPD-Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit“, Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag, Berlin 2006
- ⁸⁶ Kuchen, Ernesto: „Spot-Monitoring zum thermischen Komfort in Bürogebäuden“, Dissertation an der Technischen Universität Braunschweig, Braunschweig, 2008
- ⁸⁷ Gossauer, Elke: „Nutzerzufriedenheit in Bürogebäuden - eine Feldstudie. Analyse von Zusammenhängen zwischen verschiedenen Komfortparametern am Arbeitsplatz“, Dissertation, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart 2008

-
- ⁸⁸ DIN 18386: „VOB Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen - Teil C: Allgemeine Technische Vertragsbedingungen für Bauleistungen (ATV) – Gebäudeautomation“, Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag, Berlin 2010
- ⁸⁹ DIN 18386: „VOB Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen - Teil C: Allgemeine Technische Vertragsbedingungen für Bauleistungen (ATV) – Gebäudeautomation“, Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag, Berlin 2010, Abschnitt 3.1.1
- ⁹⁰ VDI 6039: „Inbetriebnahmemanagement für Gebäude“, Verein Deutscher Ingenieure e.V., Düsseldorf 2011
- ⁹¹ VDI 6039: „Inbetriebnahmemanagement für Gebäude“, Verein Deutscher Ingenieure e.V., Düsseldorf 2011, S. 3
- ⁹² DIN 32736: „Gebäudemanagement - Begriffe und Leistungen“, Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag, Berlin 2000
- ⁹³ DIN 18960: „Nutzungskosten im Hochbau“, Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag, Berlin 2008
- ⁹⁴ DIN 276: „Kosten im Bauwesen“, Normenausschuss Bauwesen (NA-Bau), Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag, Berlin 2008
- ⁹⁵ GEFMA, Deutscher Verband für Facility Management: „Facility Management - Grundlagen“, 100-1, Bonn 2004
- ⁹⁶ Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung – EnEV), Bundesgesetzblatt Jahrgang 2007 Teil I Nr. 34 § 11, ausgegeben zu Bonn am 26. Juli 2007
- ⁹⁷ Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung – EnEV), Bundesgesetzblatt Jahrgang 2007 Teil I Nr. 34 §§ 16-21, ausgegeben zu Bonn am 26. Juli 2007
- ⁹⁸ Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung – EnEV), Bundesgesetzblatt Jahrgang 2007 Teil I Nr. 34 § 12, ausgegeben zu Bonn am 26. Juli 2007
- ⁹⁹ DIN EN 15239: „Lüftung von Gebäuden – Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden – Leitlinien für die Inspektion von Lüftungsanlagen“, Deutsches Institut für Normung, August 2007
- ¹⁰⁰ DIN EN 15240: „Lüftung von Gebäuden – Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden – Leitlinien für die Inspektion von Klimaanlage“, Deutsches Institut für Normung, August 2007
- ¹⁰¹ Franzke, Uwe; Heiko Schiller: „Untersuchungen zum Energieeinsparpotenzial der Raumluftechnik in Deutschland“, Dresden, 2011
- ¹⁰² DIN 32736: „Gebäudemanagement - Begriffe und Leistungen“, Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag, Berlin 2000
- ¹⁰³ DIN 32736: „Gebäudemanagement - Begriffe und Leistungen“, Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag, Berlin 2000
- ¹⁰⁴ GEFMA 124-1: „Energiemanagement, Grundlagen und Leistungsbild“, August 2008, S. 4
- ¹⁰⁵ GEFMA 124-1: „Energiemanagement, Grundlagen und Leistungsbild“, August 2008, S. 7
- ¹⁰⁶ GEFMA 124-1: „Energiemanagement, Grundlagen und Leistungsbild“, August 2008, S. 8
- ¹⁰⁷ GEFMA 124-2: „Energiemanagement, Methoden“, August 2008
- ¹⁰⁸ GEFMA 124-2: „Energiemanagement, Methoden“, August 2008, S. 11

-
- ¹⁰⁹ DIN EN 16001: „Energiemanagementsysteme – Anforderungen mit Anleitung zur Anwendung“, Deutsche Fassung EN 16001:2009, S. 4
- ¹¹⁰ Deming, W. Edwards: “Out of the Crisis”, MIT Press, 2000
- ¹¹¹ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU): „DIN EN 16001: Energiemanagementsysteme in der Praxis - Ein Leitfaden für Unternehmen und Organisationen“, Berlin 2010, S. 18
- ¹¹² Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU): „DIN EN 16001: Energiemanagementsysteme in der Praxis - Ein Leitfaden für Unternehmen und Organisationen“, Berlin 2010
- ¹¹³ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU): „DIN EN 16001: Energiemanagementsysteme in der Praxis - Ein Leitfaden für Unternehmen und Organisationen“, Berlin 2010, S. 12
- ¹¹⁴ Verordnung (EG) Nr. 1221/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 25. November 2009 über die freiwillige Teilnahme von Organisationen an einem Gemeinschaftssystem für Umweltmanagement und Umweltbetriebsprüfung und zur Aufhebung der Verordnung (EG) Nr. 761/2001, sowie der Beschlüsse der Kommission 2001/681/EG und 2006/193/EG
- ¹¹⁵ Geschäftsstelle des Umweltgutachterausschusses: Infoblatt EMAS, Berlin 2010
- ¹¹⁶ DIN EN ISO 14001: „Umweltmanagementsysteme - Anforderungen mit Anleitung zur Anwendung“, Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag, Berlin 2009
- ¹¹⁷ Office for Official Publications of the European Communities: “EMAS Energy Efficiency Toolkit for Small and Medium sized Enterprises”, European Communities, Luxemburg 2004
- ¹¹⁸ AMEV (Hrsg.): „Hinweise zum Energiemanagement in öffentlichen Gebäuden“, Arbeitskreis Maschinen- und Elektrotechnik staatlicher und kommunaler Verwaltungen (AMEV), lfd. Nr. 104, Berlin 2010
- ¹¹⁹ AMEV (Hrsg.): „Hinweise zum Energiemanagement in öffentlichen Gebäuden“, Arbeitskreis Maschinen- und Elektrotechnik staatlicher und kommunaler Verwaltungen (AMEV), lfd. Nr. 104, Berlin 2010, S. 12
- ¹²⁰ AMEV (Hrsg.): „Hinweise zum Energiemanagement in öffentlichen Gebäuden“, Arbeitskreis Maschinen- und Elektrotechnik staatlicher und kommunaler Verwaltungen (AMEV), lfd. Nr. 104, Berlin 2010, S. 20
- ¹²¹ Arbeitskreis Maschinen- und Elektrotechnik staatlicher und kommunaler Verwaltungen (AMEV) - Broschüre Nr. 078: „Messgeräte für Energie und Medien (EnMess 2001) „Geräteausstattung zur Energie- und Medienerfassung“, Berlin 2001
- ¹²² Arbeitskreis Maschinen- und Elektrotechnik staatlicher und kommunaler Verwaltungen (AMEV) Broschüre-Nr. 048: „EVA 92 - Energieverbrauchserfassung und Grundlagen zur Auswertung für öffentliche Gebäude“, Berlin 1992
- ¹²³ Arbeitskreis Maschinen- und Elektrotechnik staatlicher und kommunaler Verwaltungen (AMEV) Broschüre-Nr. 087: Hinweise für Planung, Ausführung und Betrieb der Gebäudeautomation in öffentlichen Gebäuden (Gebäudeautomation 2005)“, Berlin 2005
- ¹²⁴ ASHRAE Guideline 0-2005: “The Commissioning Process”, Atlanta/Georgia, USA, 2005
- ¹²⁵ Website: <http://www.usgbc.org/DisplayPage.aspx?CategoryID=19>, Aufruf am 03.02.2012

-
- ¹²⁶ Mansson, Lars-Göran et alt.: „Controlling and Regulating Heating, Cooling and Ventilation - Methods and Examples”, Summary of IEA Annex 16 and 17, ECBCS 1997
- ¹²⁷ Mansson, Lars-Göran et alt.: „Controlling and Regulating Heating, Cooling and Ventilation - Methods and Examples”, Summary of IEA Annex 16 and 17, ECBCS 1997
- ¹²⁸ Mansson, Lars-Göran et alt.: „Controlling and Regulating Heating, Cooling and Ventilation - Methods and Examples”, Summary of IEA Annex 16 and 17, ECBCS 1997
- ¹²⁹ Mansson, Lars-Göran et alt.: „Controlling and Regulating Heating, Cooling and Ventilation - Methods and Examples”, Summary of IEA Annex 16 and 17, ECBCS 1997, S. 2
- ¹³⁰ Mansson, Lars-Göran et alt.: „Controlling and Regulating Heating, Cooling and Ventilation - Methods and Examples”, Summary of IEA Annex 16 and 17, ECBCS 1997, S. 15
- ¹³¹ Mansson, Lars-Göran et alt.: „Controlling and Regulating Heating, Cooling and Ventilation - Methods and Examples”, Summary of IEA Annex 16 and 17, ECBCS 1997, S. 24
- ¹³² Liddament, Martin W.: „Real Time Simulation of HVAC Systems for Buildings – Optimization, Fault Detection and Diagnostics”, IEA ECBCS Annex 25 Technical Synthesis Report, 1997
- ¹³³ Liddament, Martin W.: „Real Time Simulation of HVAC Systems for Buildings – Optimization, Fault Detection and Diagnostics”, IEA ECBCS Annex 25 Technical Synthesis Report, 1997, Seite 1
- ¹³⁴ Liddament, Martin W.: „Real Time Simulation of HVAC Systems for Buildings – Optimization, Fault Detection and Diagnostics”, IEA ECBCS Annex 25 Technical Synthesis Report, 1997, Seite 2
- ¹³⁵ Liddament, Martin W.: „Real Time Simulation of HVAC Systems for Buildings – Optimization, Fault Detection and Diagnostics”, IEA ECBCS Annex 25 Technical Synthesis Report, 1997
- ¹³⁶ Ferretti, Natascha Milesi et alt.: „Annex 47 Cost Effective Commissioning of Existing and Low Energy Buildings “, Report 1-4, IEA ECBCS, 2010
- ¹³⁷ Visier , Dr. Jean Christophe: „Commissioning tools for improved energy performance – Results of IEA ECBCS Annex 40“, S. 9
- ¹³⁸ Jagpal, Rajinder: „Computer Aided Evaluation of HVAC System Performance”, IEA Annex 34 Technical Synthesis Report, 2006
- ¹³⁹ Jagpal, Rajinder: „Computer Aided Evaluation of HVAC System Performance”, IEA Annex 34 Technical Synthesis Report, 2006, S. 11
- ¹⁴⁰ Jagpal, Rajinder: „Computer Aided Evaluation of HVAC System Performance”, IEA Annex 34 Technical Synthesis Report, 2006, S. 15
- ¹⁴¹ Visier , Dr. Jean Christophe: „Commissioning tools for improved energy performance – Results of IEA ECBCS Annex 40“, S. 13
- ¹⁴² Baumann, Oliver: “OASE - Optimierung der Automationsfunktionen betriebstechnischer Anlagen mit Hilfe der dynamischen Simulation als Energie-Management-System“, Abschlussbericht zum Vorhaben OASE, Förderkennzeichen 0327246D, München 2005
- ¹⁴³ Stachowiak, Herbert: „Allgemeine Modelltheorie“, Springer-Verlag, Wien/New York, 1973
- ¹⁴⁴ Stachowiak, Herbert: „Allgemeine Modelltheorie“, Springer-Verlag, Wien/New York, 1973, Seit 131
- ¹⁴⁵ Stachowiak, Herbert: „Allgemeine Modelltheorie“, Springer-Verlag, Wien/New York, 1973, Seit 132
- ¹⁴⁶ Stachowiak, Herbert: „Allgemeine Modelltheorie“, Springer-Verlag, Wien/New York, 1973, Seit 132

-
- ¹⁴⁷ Isermann, Rolf: „Fault-diagnosis systems : an introduction from fault detection to fault tolerance“, Springer, Berlin/New York 2006, Abschnitt 5.2, S. 71
- ¹⁴⁸ Isermann, Rolf: „Fault-diagnosis systems : an introduction from fault detection to fault tolerance“, Springer, Berlin/New York 2006, Abschnitt 5.2, S. 73
- ¹⁴⁹ Katipamula, PhD Srinivas; Brambley, PhD Michael R.: “Methods for Fault Detection, Diagnostics, and Prognostics for Building Systems - A Review”, Part I, Vol 11, Nr 1, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. (ASHRAE) 2005
- ¹⁵⁰ Katipamula, PhD Srinivas; Brambley, PhD Michael R.: “Methods for Fault Detection, Diagnostics, and Prognostics for Building Systems - A Review”, Part I, Vol 11, Nr 1, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. (ASHRAE) 2005, S. 9
- ¹⁵¹ Katipamula, Srinivas et al.: “Task Report for the Energy Efficient and Affordable Small, Project 2.7 – Enabling Tools, Task 2.7.4”, Richland/WA, USA, 2002
- ¹⁵² House, J. M., H. Vaezi-Nejad: “APAR: AHU Performance Assessment Rules”, in Demonstrating Automated Fault Detection and Diagnosis Methods in Real Buildings, VTT, Espoo/Finland, 2001, Seite 254
- ¹⁵³ House, J. M., H. Vaezi-Nejad: “APAR: AHU Performance Assessment Rules”, in Demonstrating Automated Fault Detection and Diagnosis Methods in Real Buildings, VTT, Espoo/Finland, 2001, Seite 281
- ¹⁵⁴ Isermann, Rolf: „Fault-diagnosis systems : an introduction from fault detection to fault tolerance“, Springer, Berlin/New York 2006, Abschnitt 1, S. 6
- ¹⁵⁵ Seem, John E., John M. House: “Evaluation of an AHU Fault Detection Scheme based on Finite State Machine Sequencing Control”, Johnson Controls Inc. & Iowa Energy Center, 2007
- ¹⁵⁶ Harel, David. “Statecharts: A Visual Formalism for Complex Systems”, Science of Computer Programming, 8:231–274, 1987.
- ¹⁵⁷ Rumpe, Bernhard: „Modellierung mit UML: Sprache, Konzepte und Methodik“, Xpert.press, 2011
- ¹⁵⁸ Rumpe, Bernhard: „Modellierung mit UML: Sprache, Konzepte und Methodik“, Xpert.press, 2011, Seite 149
- ¹⁵⁹ Isermann, Rolf: „Fault-diagnosis systems : An introduction from fault detection to fault tolerance“, Springer, Berlin/New York 2006, Abschnitt 1, S. 20
- ¹⁶⁰ Isermann, Rolf: „Fault-diagnosis systems : An introduction from fault detection to fault tolerance“, Springer, Berlin/New York 2006, Abschnitt 1, S. 21
- ¹⁶¹ Isermann, Rolf: „Fault-diagnosis systems : an introduction from fault detection to fault tolerance“, Springer, Berlin/New York 2006, Abschnitt 1, S. 14
- ¹⁶² Haves, P., “Overview of Diagnostic Methods,” Proceedings of the Workshop on Diagnostics for Commercial Buildings: From Research to Practice, Pacific Energy Center, San Francisco, 16.-17. Juni 1999, <http://poet.lbl.gov/diagworkshop/proceedings>
- ¹⁶³ VDI 4602 Teil 1: „Energiemanagement – Begriffe“, VDI-Fachbereich Technische Gebäudeausrüstung, Düsseldorf 2007, S. 27-28
- ¹⁶⁴ Friedman, Hannah et al.: „Comparative Guide to Emerging Diagnostic Tools for Large Commercial HVAC Systems“, Ernest Orlando Lawrence Berkeley Laboratory, Berkeley 2001, S. 27-28

-
- ¹⁶⁵ Linß, Gerhard: „Qualitätsmanagement für Ingenieure“, Hanser Fachbuchverlag, 2. Auflage, 2005, Abschnitt 12.5, S. 202
- ¹⁶⁶ Katipamula, PhD Srinivas; Brambley, PhD Michael R.: “Methods for Fault Detection, Diagnostics, and Prognostics for Building Systems - A Review”, Part II, Vol 11, Nr 2, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. (ASHRAE) 2005; Seite 181
- ¹⁶⁷ DIN EN ISO 16484-3: „Systeme der Gebäudeautomation – Teil 3: Funktionen“, Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag, Berlin 2005, Seite 3
- ¹⁶⁸ VDI 3814 Teil 1: „Gebäudeautomation (GA) - Systemgrundlagen“, VDI Fachbereich Technische Gebäudeausrüstung, Düsseldorf, 2007, Seite
- ¹⁶⁹ IEC 60617 DB: „Graphische Symbole für Schaltpläne“, ÖVE/ÖNORM IEC, 2005
- ¹⁷⁰ DIN 19227: „Leittechnik – Grafisch Symbole und Kennbuchstaben für die Prozesstechnik“, Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag, Berlin 1991
- ¹⁷¹ DIN EN ISO 16484-3: „Systeme der Gebäudeautomation – Teil 3: Funktionen“, Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag, Berlin 2005, Bild B.1, Seite 74
- ¹⁷² VDI 3525: „Regelung und Steuerung Raumluftechnischer Anlagen – Beispiele“, VDI-Fachbereich Technische Gebäudeausrüstung, Düsseldorf 2007, Abschnitt 2.3, S. 10
- ¹⁷³ VDI 3525: „Regelung und Steuerung Raumluftechnischer Anlagen – Beispiele“, VDI-Fachbereich Technische Gebäudeausrüstung, Düsseldorf 2007, Abschnitt 2.3, Bild 7, S. 11
- ¹⁷⁴ DIN EN ISO 16484-3: „Systeme der Gebäudeautomation – Teil 3: Funktionen“, Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag, Berlin 2005, Bild B.1, Seite 79
- ¹⁷⁵ VDI 3814: „Gebäudeautomation (GA)“, Verband Deutscher Ingenieure, Düsseldorf, 2005, Abschnitt 11.2, S. 60
- ¹⁷⁶ VDI 3525: „Regelung und Steuerung Raumluftechnischer Anlagen – Beispiele“, VDI-Fachbereich Technische Gebäudeausrüstung, Düsseldorf 2007, Abschnitt 3.1, S. 13
- ¹⁷⁷ DIN EN ISO 16484-3: „Systeme der Gebäudeautomation – Teil 3: Funktionen“, Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag, Berlin 2005, Bild B.1, Seite 80
- ¹⁷⁸ VDI 3681: „Einordnung und Bewertung von Beschreibungsmitteln aus der Automatisierungstechnik“, Abschnitt 3, S. 5, VDI-Fachbereich Technische Gebäudeausrüstung, Düsseldorf 2005
- ¹⁷⁹ VDI 3814 Teil 6: „Gebäudeautomation (GA) - Grafische Darstellung von Steuerungsaufgaben“, VDI-Fachbereich Technische Gebäudeausrüstung, Düsseldorf 2008, Einleitung, S. 2
- ¹⁸⁰ VDI 3814 Teil 6: „Gebäudeautomation (GA) - Grafische Darstellung von Steuerungsaufgaben“, VDI-Fachbereich Technische Gebäudeausrüstung, Düsseldorf 2008, Bild 2, S. 6
- ¹⁸¹ VDI 3814 Teil 6: „Gebäudeautomation (GA) - Grafische Darstellung von Steuerungsaufgaben“, VDI-Fachbereich Technische Gebäudeausrüstung, Düsseldorf 2008, Abschnitt 6.5, S. 15
- ¹⁸² Siemens S7-HiGraph, Webseite: <http://www.automation.siemens.com/mcms/simatic-controller-software/de/optionen-programmierung/simatic-s7-higraph/Seiten/Default.aspx>, Abruf: 01.02.2012

-
- ¹⁸³ DIN EN ISO 16484-3: „Systeme der Gebäudeautomation – Teil 3: Funktionen“, Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag, Berlin 2005, Bild B.1, Seite 80
- ¹⁸⁴ VDI 3814 Teil 1: „Gebäudeautomation (GA) - Systemgrundlagen“, VDI Fachbereich Technische Gebäudeausrüstung, Düsseldorf, 2007, Abschnitt 6, S. 18
- ¹⁸⁵ VDI 3814 Teil 1: Teil 1: „Gebäudeautomation (GA) - Systemgrundlagen“, VDI Fachbereich Technische Gebäudeausrüstung, Düsseldorf, 2007, Anhang B S. 72 ff
- ¹⁸⁶ VDI 3814 Teil 1: „Gebäudeautomation (GA) - Systemgrundlagen“, VDI Fachbereich Technische Gebäudeausrüstung, Düsseldorf, 2007, Abschnitt 6, S. 19
- ¹⁸⁷ ISO 3511 Teile 1-3: „Messen, Steuern, Regeln in der Verfahrenstechnik; Zeichen für die funktionelle Darstellung“, Internationale Organisation für Normung 1984
- ¹⁸⁸ DIN 19227: „Leittechnik – Grafisch Symbole und Kennbuchstaben für die Prozesstechnik“, Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag, Berlin 1991
- ¹⁸⁹ Balow, Jörg: „Systeme der Gebäudeautomation“, cci Dialog GmbH, Karlsruhe, 2012, Seite 478
- ¹⁹⁰ Balow, Jörg: „Systeme der Gebäudeautomation“, cci Dialog GmbH, Karlsruhe, 2012, Seite 484
- ¹⁹¹ Funktionsbeschreibung „Neues Regionshaus Hannover“, Ingenieurbüro HSK, 2007, unveröffentlicht
- ¹⁹² Funktionsbeschreibung „Neues Regionshaus Hannover“, Ingenieurbüro HSK, 2007, unveröffentlicht
- ¹⁹³ Funktionsbeschreibung „Neues Regionshaus Hannover“, Ingenieurbüro HSK, 2007, unveröffentlicht
- ¹⁹⁴ Funktionsbeschreibung „Neues Regionshaus Hannover“, Ingenieurbüro HSK, 2007, unveröffentlicht
- ¹⁹⁵ Funktionsbeschreibung „Neues Regionshaus Hannover“, Ingenieurbüro HSK, 2007, unveröffentlicht
- ¹⁹⁶ Funktionsbeschreibung „Neues Regionshaus Hannover“, Ingenieurbüro HSK, 2007, unveröffentlicht
- ¹⁹⁷ Funktionsbeschreibung „Neues Regionshaus Hannover“, Ingenieurbüro HSK, 2007, unveröffentlicht
- ¹⁹⁸ Funktionsbeschreibung „Energieforum Berlin“, Fa. Honeywell, 2004, unveröffentlicht
- ¹⁹⁹ Funktionsbeschreibung „Energieforum Berlin“, Fa. Honeywell, 2004, unveröffentlicht
- ²⁰⁰ Funktionsbeschreibung „Energieforum Berlin“, Fa. Honeywell, 2004, unveröffentlicht
- ²⁰¹ Funktionsbeschreibung „Energieforum Berlin“, Fa. Honeywell, 2004, unveröffentlicht
- ²⁰² Funktionsbeschreibung „VGH Lüneburg“, Johnson Controls, 2002, unveröffentlicht
- ²⁰³ Funktionsbeschreibung „VGH Lüneburg“, Johnson Controls, 2002, unveröffentlicht
- ²⁰⁴ Funktionsbeschreibung „VGH Lüneburg“, Johnson Controls, 2002, unveröffentlicht
- ²⁰⁵ Funktionsbeschreibung Bürogebäude Neumühlen 4, Intec Versorgungstechnik GmbH & Co KG und Dieter Schmadtke Elektronik GmbH, 2005, unveröffentlicht

-
- ²⁰⁶ Funktionsbeschreibung Bürogebäude Neumühlen 4, Intec Versorgungstechnik GmbH & Co KG und Dieter Schmadtke Elektronik GmbH, 2005, unveröffentlicht
- ²⁰⁷ Funktionsbeschreibung Bürogebäude Neumühlen 4, Intec Versorgungstechnik GmbH & Co KG und Dieter Schmadtke Elektronik GmbH, 2005, unveröffentlicht
- ²⁰⁸ Funktionsbeschreibung Volkswagen-Bibliothek, Kieback & Peter GmbH & Co. KG, 2005, unveröffentlicht
- ²⁰⁹ Funktionsbeschreibung Volkswagen-Bibliothek, Kieback & Peter GmbH & Co. KG, 2005, unveröffentlicht
- ²¹⁰ Funktionsbeschreibung Volkswagen-Bibliothek, Kieback & Peter GmbH & Co. KG, 2005, unveröffentlicht
- ²¹¹ Funktionsbeschreibung Volkswagen-Bibliothek, Kieback & Peter GmbH & Co. KG, 2005, unveröffentlicht
- ²¹² Funktionsbeschreibung Volkswagen-Bibliothek, Kieback & Peter GmbH & Co. KG, 2005, unveröffentlicht
- ²¹³ Funktionsbeschreibung Volkswagen-Bibliothek, Kieback & Peter GmbH & Co. KG, 2005, unveröffentlicht
- ²¹⁴ Funktionsbeschreibung Volkswagen-Bibliothek, Kieback & Peter GmbH & Co. KG, 2005, unveröffentlicht
- ²¹⁵ Funktionsbeschreibung Gelsenwasser, Fa. Axima, kein Datum, unveröffentlicht
- ²¹⁶ Funktionsbeschreibung Gelsenwasser, Fa. Axima, kein Datum, unveröffentlicht
- ²¹⁷ Funktionsbeschreibung Gelsenwasser, Fa. Axima, kein Datum, unveröffentlicht
- ²¹⁸ Funktionsbeschreibung Gelsenwasser, Fa. Axima, kein Datum, unveröffentlicht
- ²¹⁹ Funktionsbeschreibung Gelsenwasser, Fa. Axima, kein Datum, unveröffentlicht
- ²²⁰ Wöhe, Dr. Dr. h.c. mult. Günter: „Einführung in die Allgemeine Betriebswirtschaftslehre“, Verlag Franz Vahlen, München, 1993
- ²²¹ Horváth, Prof. Péter: "Controlling", Vahlen Franz GmbH, München 2009, 11. vollständig überarbeitete Auflage
- ²²² Wöhe, Dr. Dr. h.c. mult. Günter: „Einführung in die Allgemeine Betriebswirtschaftslehre“, Verlag Franz Vahlen, München 1993
- ²²³ Dexter, Arthur et al: "Demonstrating Automated Fault Detection and Diagnosis Methods in Real Buildings", VTT, Espoo/Finland, 2001, Seite 356
- ²²⁴ Hein, Anatoli: "Entwicklung und Erprobung einer regelbasierten Methode zur Optimierung und Überwachung von Lüftungsanlagen", Diplomarbeit, Fachhochschule Braunschweig/Wolfenbüttel, 2008
- ²²⁵ Del Vecchio, Simon: "Automatische Betriebskontrolle am Beispiel einer solarthermischen Großanlage", Masterarbeit, Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaft, 2011
- ²²⁶ DIN EN ISO 16484-1: „Systeme der Gebäudeautomation – Teil 1: Projektplanung und -ausführung“, Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag, Berlin 2004, Seite 34
- ²²⁷ Plessner, Stefan; Claas Pinkernell, Norbert M. Fisch, Bernhard Rump: „The Energy Navigator – A Web-Platform for Performance Design and Management“, IEECB – Increasing Energy Efficiency in Commercial Buildings, Conference Proceedings, Frankfurt, 2012

-
- ²²⁸ Pinkernell, Claas et al.: "The Energy-Navigator – A Web Based Platform for Functional Quality Management in Buildings", ICEBO – International Conference on Enhanced Building Operations 2010, Kuwait, 2010
- ²²⁹ DIN 19227-2: „Leittechnik – Grafisch Symbole und Kennbuchstaben für die Prozesstechnik – Darstellung von Einzelheiten“, Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag, Berlin 1991
- ²³⁰ VDI 3814 Teil 1: „Gebäudeautomation (GA) - Systemgrundlagen“, VDI Fachbereich Technische Gebäudeausrüstung, Düsseldorf, 2007, Abschnitt 9.3.3 (5.3), Seite 43
- ²³¹ Wellenreuther, Günter; Dieter Zastrow: „Steuerungstechnik mit SPS“, Verlag Vieweg, Braunschweig / Wiesbaden, 1998
- ²³² Plesser, Stefan et al.: "Der Energie-Navigator, Performance-Controlling für Gebäude und Anlagen", TAB – Technik am Bau, 4-2011, Seiten 36-41, bauverlag, 2011
- ²³³ Pinkernell, Claas et al.: „State-Based Modeling of Buildings and Facilities“, ICEBO – International Conference on Enhanced Building Operations 2011, New York City, NY/USA, 2011
- ²³⁴ Plesser, Stefan; Norbert Fisch: "Demonstrationsprojekt Neues Regionshaus Hannover: Energieoptimiertes Bauen in Public- Private-Partnerships", Schlussbericht zum Forschungsprojekt (FKZ: 0335007X), Braunschweig, 2011
- ²³⁵ Funktionsbeschreibung „Neues Regionshaus Hannover“, Ingenieurbüro HSK, 2007, unveröffentlicht
- ²³⁶ Plesser, Stefan; Norbert Fisch: "Demonstrationsprojekt Neues Regionshaus Hannover: Energieoptimiertes Bauen in Public- Private-Partnerships", Schlussbericht zum Forschungsprojekt (FKZ: 0335007X), Braunschweig, 2011
- ²³⁷ Plesser, Stefan; M. Norbert Fisch: „Das neue Regionshaus Hannover, Energieoptimiertes Bauen im PPP“, Abschlussbericht, FKZ: 0335007X, Braunschweig, 2010
- ²³⁸ ennovatis Controlling, ennovatis GmbH
- ²³⁹ Funktionsbeschreibung „Neues Regionshaus Hannover“, Ingenieurbüro HSK, 2007, unveröffentlicht
- ²⁴⁰ Funktionsbeschreibung „Neues Regionshaus Hannover“, Ingenieurbüro HSK, 2007, unveröffentlicht
- ²⁴¹ Funktionsbeschreibung „Neues Regionshaus Hannover“, Ingenieurbüro HSK, 2007, unveröffentlicht
- ²⁴² Funktionsbeschreibung „Neues Regionshaus Hannover“, Ingenieurbüro HSK, 2007, unveröffentlicht
- ²⁴³ DIN EN 13779: „Lüftung von Nichtwohngebäuden“, Seite 6, DIN Deutsches Institut für Normung, September 2007
- ²⁴⁴ Funktionsbeschreibung „Neues Regionshaus Hannover“, Ingenieurbüro HSK, 2007, unveröffentlicht
- ²⁴⁵ Büro HSK: „Funktionsbeschreibung der Gebäudeautomation“, Revisionsunterlage zum Gebäude, 2007, unveröffentlicht
- ²⁴⁶ Büro HSK: „Funktionsbeschreibung der Gebäudeautomation“, Revisionsunterlage zum Gebäude, 2007, unveröffentlicht
- ²⁴⁷ Büro HSK: „Funktionsbeschreibung der Gebäudeautomation“, Revisionsunterlage zum Gebäude, 2007, unveröffentlicht
- ²⁴⁸ Büro HSK: „Funktionsbeschreibung der Gebäudeautomation“, Revisionsunterlage zum Gebäude, 2007, unveröffentlicht
- ²⁴⁹ Büro HSK: „Funktionsbeschreibung der Gebäudeautomation“, Revisionsunterlage zum Gebäude, 2007, unveröffentlicht

-
- ²⁵⁰ Büro HSK: „Funktionsbeschreibung der Gebäudeautomation“, Revisionsunterlage zum Gebäude, 2007, unveröffentlicht
- ²⁵¹ Fisch, M. Norbert, Franziska Bockelmann et al.: „WKSP – Wärme- und Kältespeicherung im Gründungsbereich energieeffizienter Bürogebäude“, Abschlussbericht zum Forschungsprojekt, FKZ: 0327364A, Braunschweig, 2010
- ²⁵² Fisch, M. Norbert, Robert Himmler: „EnergieForum Berlin“, Abschlussbericht zum Forschungsprojekt, FKZ 0335007E, Braunschweig, 2006
- ²⁵³ Wärme + Wasser GmbH: „Revision Schema energiepfähle / Betonkernaktivierung“, Revisionsunterlage zum Gebäude, 2003
- ²⁵⁴ Fisch, M. Norbert, Franziska Bockelmann et al.: „WKSP – Wärme- und Kältespeicherung im Gründungsbereich energieeffizienter Bürogebäude“, Abschlussbericht zum Forschungsprojekt, FKZ: 0327364A, Braunschweig, 2010
- ²⁵⁵ ennovatis Controlling, ennovatis GmbH
- ²⁵⁶ Fa. Honeywell, Funktionsbeschreibung aus der Gebäudedokumentation, keine Datumsangabe
- ²⁵⁷ Fa. Honeywell, Funktionsbeschreibung aus der Gebäudedokumentation, keine Datumsangabe
- ²⁵⁸ VOB Vergabe – und Vertragsordnung für Bauleistungen - Teil C: Allgemeine Technische Vertragsbedingungen für Bauleistungen (ATV) – Gebäudeautomation, Deutsches Institut für Normung, Oktober 2006
- ²⁵⁹ DIN 16484-3: „Systeme der Gebäudeautomation“, Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag, Berlin 2004
- ²⁶⁰ DIN 18386: „VOB Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen - Teil C: Allgemeine Technische Vertragsbedingungen für Bauleistungen (ATV) – Gebäudeautomation“, Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag, Berlin 2010, S. 8
- ²⁶¹ DIN 18386: „VOB Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen - Teil C: Allgemeine Technische Vertragsbedingungen für Bauleistungen (ATV) – Gebäudeautomation“, Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag, Berlin 2010, Seite 9